

VYSOKÁ ŠKOLA BÁŇSKÁ
TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA
KATEDRA ENERGETIKY

**Rekonstrukce kotle K9 za účelem dodržení nových emisních
limitů**

Reconstruction of the K9 Boiler to Accomplish New Emission Limits

Vypracoval: Bc. Dominik Matouš

Vedoucí ročníkového projektu: **Ing. Jan Matoušek, Ph.D.**

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra energetiky

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Dominik Matouš**
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: 2302T006 Energetické stroje a zařízení
Téma: **Rekonstrukce kotle K9 za účelem dodržení nových emisních limitů**
Reconstruction of the K9 Boiler to Accomplish New Emission Limits
Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

1. Proveďte rešerši stávajících a nových emisních limitů NO_x ze zdrojů znečišťování ovzduší.
2. Způsoby řešení snižování emisí NO_x ze zdrojů znečišťování ovzduší.
3. Aplikace získaných poznatků ze způsobů snižování emisí NO_x na kotli K9.
4. Způsoby monitorování a vyhodnocení emisí NO_x po rekonstrukci kotle K9.
5. Vyhodnocení rekonstrukce kotle K9 z ekonomického, ekologického a energetického hlediska.

Seznam doporučené odborné literatury:


VILIMEC, Ladislav. Stavba kotlů. I. díl - přepracované vydání, Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2002. 80-248-0076-4.
VILIMEC, Ladislav. Stavba kotlů. II. díl. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 1999. ISBN 80-7078-681-7.
INTEGRATED POLLUTION PREVENTION AND CONTROL (IPPC). Reference Document on Best Available Techniques for Large Combustion Plants. European Commission, July 2006.
ČERNÝ, V. a kol.: Parní kotle. Praha: SNTL, 1983.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Jan Matoušek, Ph.D.**

Datum zadání: 21.12.2018

Datum odevzdání: 20.05.2019


doc. Ing. Stanislav Honus, Ph.D.
vedoucí katedry




prof. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

VŠB - TUO, Katedra energetiky; Rekonstrukce kotle K9 za účelem dodržení nových emisních limitů

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny podklady a literaturu.

V Ostravě 20.5.2019.....

Podpis studenta Matoš.....

VŠB - TUO, Katedra energetiky; Rekonstrukce kotle K9 za účelem dodržení nových emisních limitů

Prohlašuji, že:

- Jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č.121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 - užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 - školní dílo.
- Beru na vědomí, že Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava (dále jen "VŠB-TUO") má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§ 35 odst. 3).
- Souhlasím s tím, že diplomová práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí, a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- Bylo sjednáno, že VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavře licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- Bylo sjednáno, že užít své dílo - diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- Beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě 20.5.2019.....

Podpis studenta .....

Adresa trvalého pobytu autora práce:
Derkova 891/5
Nový Jičín, 74101

Plné jméno autora práce:
Dominik Matouš

Poděkování

Děkuji vedoucímu mé diplomové práce panu Ing. Janovi Matouškovi, Ph.D. za čas, ochotu a cenné rady při vypracování mé diplomové práce.

ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

Matouš, D. *Rekonstrukce kotle K9 za účelem dodržení nových technických limitů: diplomová práce*. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, katedra energetiky, 91 str., 2019, vedoucí práce Ing. Jan Matoušek, Ph.D.

Předmětem této diplomové práce je popsání nových a stávajících limitů NO_x . Popis způsobů snižování NO_x ze zdrojů znečišťování ovzduší a jejich aplikace na kotel K9. Podrobný popis kotle K9 a jeho primární a sekundární opatření. Jakým způsobem se monitoruje NO_x na kotli K9 a jejich následné vyhodnocení. V posledním kroku je popis vyhodnocení kotle K9 z hlediska ekonomického, ekologického a energetického.

ANNOTATION OF THESIS

Matouš, D. *Reconstruction of the K9 Boiler to Accomplish New Emission Limits: Diploma thesis*. Ostrava: VŠB - Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Power Engineering, 2016, page 91, Thesis head: Ing. Jan Matoušek, Ph.D.

The subject of this diploma thesis is to describe of new and current NO_x limits. Description of possibilities of reducing NO_x from the sources of air pollution and then their application on boiler K9. Detailed description of boiler K9 and its primary and secondary measures. How NO_x is monitored on boiler K9 and their subsequent evaluation. The last step is the description of the boiler K9 in terms of economic, ecological and energy.

Obsah

1	Úvod	9
2	Vznik oxidů dusíku NO _x	11
2.1	Typy oxidů dusíku NO _x [10]	11
2.1.1	Termické NO _x	11
2.1.2	Palivové NO _x	12
2.1.3	Rychlé NO _x	12
3	Popis nových a stávajících emisních limitů NO _x pro tuhá paliva	13
3.1	Stávající emisní limity NO _x	13
3.2	Nové emisní limity NO _x v roce 2021	14
3.3	NO _x v České republice	15
4	Způsoby snižování emisí NO _x	19
4.1	Primární opatření	19
4.1.1	Celkové shrnutí snižování NO _x pomocí primárního opatření	25
4.2	Sekundární opatření	26
4.2.1	Selektivní katalytická redukce - SCR	26
4.2.2	Selektivní nekatalytická redukce - SNCR	30
4.3	Emisní limity pro kotel K9	33
5	Popis kotle K9	35
5.1	Technická data kotle a jeho stručný popis	35
5.2	Základní údaje paliva	36
5.2.1	Černé uhlí	36
5.2.2	Vysokopecní plyn	37
5.2.3	Koksárenský plyn	37
6	Stechiometrické výpočty	39
6.1	Výpočet objemů spalovacího vzduchu a spalin	39
6.1.1	Pro uhlí	39
6.1.2	Pro směs plynu	41
6.2	Parametry spalin při nedokonalém spalování	44
6.2.1	Pro uhlí	44
6.2.2	Pro směs plynu	46
6.2.3	Vypočtené hodnoty	48
6.3	Střední měrná tepelná kapacita spalin	48

7	Určení teploty rosného bodu	52
8	Tepelné ztráty kotle a výpočet nepřímé účinnosti	53
8.1	Shrnutí jednotlivých ztrát a určení účinnosti	56
9	Hlavní části kotle a jeho další technická zařízení	57
9.1	Topeniště, spalovací komora	57
9.2	Buben, vestavba, závěsy	58
9.3	Výparník kotle	59
9.4	Přehřívák kotle, vstřikovací regulace teploty přehřáté páry	60
9.5	Ohřívák vody (EKO 1, EKO 2)	60
9.6	Ohřívák vzduchu (LUVO 1, LUVO 2)	60
9.7	Mlecí zařízení	61
9.8	Hořáky	63
10	Aplikace metody SNCR na kotli K9	66
10.1	Návrh vstřikovacího kopí	67
10.2	Návrh nosného a rozprašovacího média	70
10.3	Výpočet množství potřebného reagentu	72
10.4	Úprava spalovací komory pro sekundární opatření	75
10.5	Návrh rozmístění trysek do spalovací komory	76
10.6	Vliv technologie SNCR z hlediska účinnosti kotle	78
11	Shrnutí výpočtů účinnosti kotle	81
12	Závěr	82
13	Seznam použitých značek a zkratk	84
13.1	Význam použitých indexů	85
14	Seznam tabulek	87
15	Seznam obrázků	88
16	Seznam grafů	89
17	Výkresové přílohy	89
18	Seznam použité literatury	90

1 Úvod

V dnešní době je v České republice kladen velký důraz na snižování emisí, i výrobu elektrické energie a tepla při spalování fosilních paliv, jako je uhlí, plyn či lehké topné oleje. Je také kladen velký důraz na ochranu životního prostředí, a to z toho důvodu, aby byla zachována možnost uspokojit životní potřeby pro obyvatele, aniž by došlo k nevratnému poškození přírody. V České republice je to zejména z toho důvodu, že z geografického hlediska má špatné podmínky na výrobu elektrické energie či tepla pomocí obnovitelných zdrojů energie, jako jsou větrné, vodní a sluneční elektrárny. Ty tvoří malou procentuální část z celkové výroby elektrické energie v ČR.

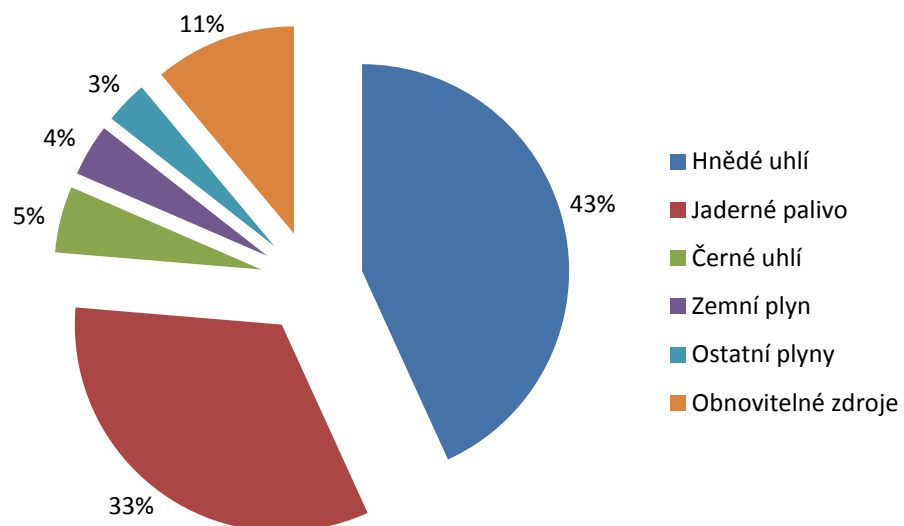
Spotřeba elektrické energie v poslední době stále stoupá. V roce 2017 překonala 61881 GWh, přitom celková výroba elektrické energie dosáhla 87574 GWh. [5]

I přesto, že postupně snižujeme množství vyrobené elektrické energie v uhelných elektrárnách - v roce 2017 klesla závislost v porovnání s rokem 2010 na černém uhlí o 22% a u hnědého je to 15%, tak mají uhelné elektrárny stále největší podíl (48%) na výrobě elektrické energie. Na druhém místě je to jaderná energie (32%) a v neposlední řadě obnovitelné zdroje (11%), jako jsou vodní, větrné a sluneční elektrárny. [5,6,7]

Důvodem proč stále převyšují uhelné elektrárny je ten, že dokážeme zajistit stálost výroby elektrické energie, kdežto u obnovitelných zdrojů to nejsme schopni.

U obnovitelných zdrojů je problém se stálou dodávkou elektrické energie proto, že není možno zajistit kontinuální větrné podmínky, stálý sluneční svit či kontinuální průtok na řekách, obzvláště při začínajícím problému nedostatku vody v některých oblastech České republiky, ale také ve světě.

Jelikož uhelné elektrárny mají stále největší podíl na vyrobené elektrické energii, budu se tady zabývat problematikou snižování emisních limitů a následně dodržení limitů oxidů dusíku u uhelných elektráren, přesněji na kotli K9 v Ostravě-Kunčicích.



Graf č.1 Podíl paliva ve výrobě elektrické energie, Zdroj: [5]

Obnovitelné zdroje tvoří: Bioplyn (3%)

Fotovoltaika (2,5%)

Biomasa (2,4%)

Vodní elektrárny(2,1%)

Větrné elektrárny (0,7%)

2 Vznik oxidů dusíku NO_x

Jsou přirozenou součástí životního prostředí. Na jejich vzniku se podílejí jakékoliv spalovací procesy, především spalování fosilních paliv za vysokých teplot, jako jsou elektrárny, teplárny či domácí kotle nebo dopravní prostředky. V atmosféře rychle reagují a poté se vracejí na zem ve formě kyselých dešťů. Jsou také významným producentem skleníkových plynů a nepříznivě ovlivňují imunitu člověka a plicní funkce.

Jedná se především o směs dvou druhů plynů, a to o oxid dusnatý NO a oxid uhličitý NO_2 . U kotlů větších výkonů je směs NO_x tvořena přibližně z 90% NO a 5-10% NO_2 . V malém množství se budou dále vyskytovat i další oxidy dusíku, jimiž jsou N_2O , N_2O_3 , N_2O_5 .

I když tvoří oxid dusnatý NO hlavní část podílu ve spalínách, po zchlazení oxiduje na oxid uhličitý NO_2 a poté s vodní párou zreaguje na kyselinou dusičnou HNO_3 a kyselinu dusitou HNO_2 . Ty pak ve tvaru srážek padají na zem ve formě kyselých dešťů, které jsou známy, že způsobují odumírání lesů a tam narušují proces fotosyntézy. [6]

2.1 Typy oxidů dusíku NO_x [10]

2.1.1 Termické NO_x

Vznikají oxidací dusíku ze spalovacího vzduchu za vysoké teploty, a to přibližně mezi 1200 až 1300 °C a na jejich tvorbu má velký vliv teplota a doba trvání ve spalovacím prostoru.

Snížení termických NO_x :

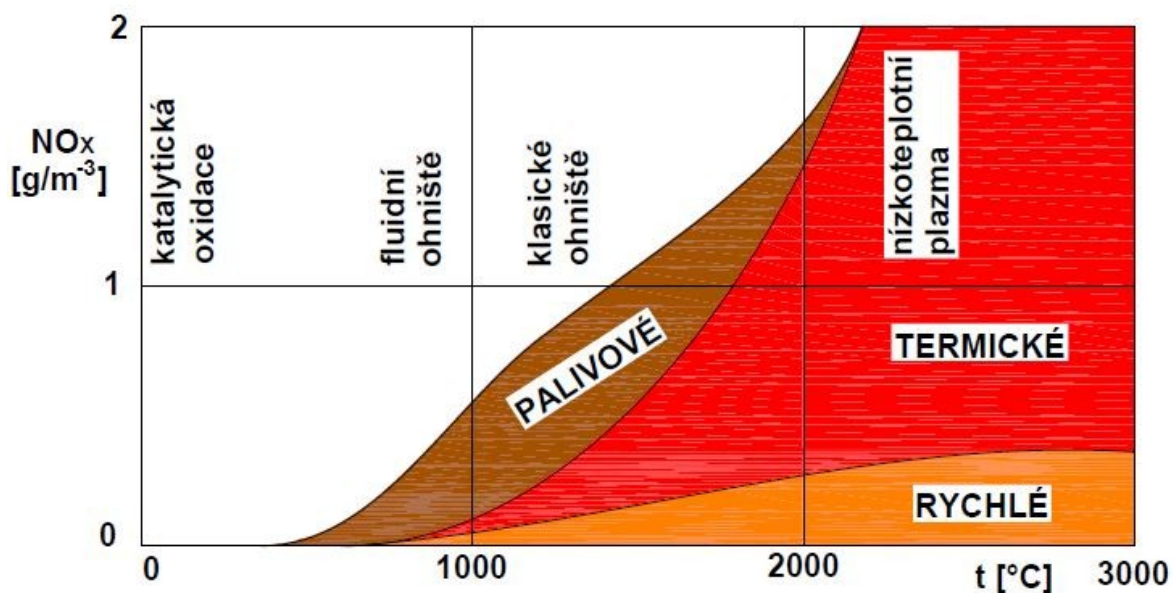
- snížení celkové teplotní úrovně
- omezení lokálních teplotních maxim
- snížení koncentrace kyslíku v oblasti maximálních teplot

2.1.2 Palivové NO_x

Vznikají z velkého podílu pomocí dusíkatých sloučenin. Tyto sloučeniny převažují hlavně u hnědého uhlí a biomasy, kde se nedosahuje vysokých teplot. Její závislost je na koncentraci kyslíku v zóně plamene.

2.1.3 Rychlé NO_x

Vznikají při spalování uhlovodíků. Jsou charakterizovány krátkou dobou, minimální závislostí na teplotě a velkou závislostí na přebytku vzduchu.



Obrázek č.1 Tvorba NO_x v závislosti na teplotě, Zdroj: [10]

3 Popis nových a stávajících emisních limitů NO_x pro tuhá paliva

Emisní limity je možné chápat jako maximálně možné množství znečišťujících látek nebo dané skupiny znečišťujících látek produkované do ovzduší z různých zdrojů. Jsou vyjádřeny jako hmotnostní koncentrace znečišťujících látek v spalínách či plynech nebo jako hmotnostní tok látek za jednotku času. [11]

Česká republika jako členský stát EU se zavázal dne 20.11.2013 dodržáním environmentální politiky do roku 2020. Přesněji se jedná o akční program EU pro životní prostředí. Z toho důvodu Ministerstvo životního prostředí klade čím dál větší důraz na inovaci spalovacích zařízení.

3.1 Stávající emisní limity NO_x

Současné průmyslové emisní limity jsou stanoveny směrnicí Evropského parlamentu a její Rady 2010/75/EU, které přišly v platnost dne 24. listopadu 2010. Za účelem této směrnice je stanovit pravidla pro prevenci a omezování znečištění ovzduší, vody a půdy a pro předcházení vzniku odpadů z velkých průmyslových zařízení. Klíčový pojem této směrnice jsou **Nejlepší dostupné technicky (BAT = Best Available Techniques)**, což jsou nejúčinnější techniky pro prevenci nebo snížení emisí, které jsou technicky dostupné a ekonomicky přijatelné v rámci odvětví.

Technická ustanovení týkající se spalovacích zařízení je možné nalézt v příloze V., část 1. a jejich mezní hodnoty emisí pro spalovací zařízení jsou uvedena v čl.30, odst. 2. Všechny mezní hodnoty emisí jsou stanoveny při teplotě $T=273,15\text{K}$ a tlaku $p=101,3\text{ kPa}$. Obsah kyslíku O_2 u pevných paliv je 6%, u kapalných a plynných 3% a 15% pro plynové turbíny a motory.

Celkový jmenovitý tepelný příkon (MW_{th})	Černé a hnědé uhlí a další pevná paliva	Biomasa a rašelina	Kapalná paliva
50 - 100	300; v případě spalování práškového hnědého uhlí 450	300	450
100 - 300	200	250	200 ⁽¹⁾
> 300	200	200	150 ⁽¹⁾

Tabulka č.1 Mezní hodnoty emisí (v mg/m^3) pro NO_x pro spalovací zařízení využívající pevná nebo kapalná paliva, s výjimkou plynových turbín a motorů, Zdroj: [1]

Vysvětlivky:

⁽¹⁾ Pro spalovací zařízení spalující zbytky, které pochází z destilace či zpracování surové ropy pro vlastní spotřebu a jejich tepelný výkon nepřekročí 500 MW je mezní emisní hodnota $450 mg/m^3$. Jejich povolení muselo být uděleno před 27. listopadem 2002 nebo jejichž provozovatel před tímto dnem podal žádost.

3.2 Nové emisní limity NO_x v roce 2021

Dne 17.srpna 2017 byly Evropskou unií rozhodnuty a zveřejněny Referenční dokumenty o nejlepších dostupných technikách ("**BREF**") pro spalovací zařízení o vyšším tepelném výkonu než 50MW, které obsahují závazné "Závěry o nejlepších dostupných technikách" ("**Závěry o BAT**"). Tyto Závěry o BAT vejdou v platnost dne 17. srpna 2021 a musí být do té doby implementovány do spalovacích zařízení. Tyto Závěry nejen, že přinášejí emisní limity pro stálé polutanty, jako jsou NO_x , SO_2 , TZL a CO, ale také zavádějí limity pro Hg, NH_3 , HCl a HF.

Celkový jmenovitý tepelný příkon spalovacího zařízení (MW_{th})	BAT - AEL (mg/Nm^3)			
	Roční průměr		Denní průměr	
	Nové zařízení	Stávající zařízení ⁽¹⁾	Nové zařízení	Stávající zařízení ⁽²⁾ ⁽³⁾
<100	100-150	100-270	155-200	165-330
100 - 300	50-100	100-180	80-130	155-210
≥300, kotel se spalováním ve fluidním loži, spalující černé a/nebo hnědé uhlí	50-85	<85-150 ⁽⁴⁾ ⁽⁵⁾	80-125	140-165 ⁽⁶⁾

a kotel s práškovým spalováním hnědého uhlí				
≥300, kotel s práškovým spalováním černého uhlí	65-85	65-150	80-125	<85-165 ⁽⁷⁾

Tabulka č.2 Závěry o BAT u emisí NO_x pro spalování černého a/nebo hnědého uhlí do ovzduší, Zdroj: [1]

Vysvětlivky:

⁽¹⁾ Tyto BAT-AEL neplatí pro stacionární zdroje, které se provozují méně jak 1500 h/rok.

⁽²⁾ Platí pro kotle s práškovým spalováním černého uhlí, které byly uvedeny do provozu nejpozději 1. července 1987 a které se provozují méně jak 1500 h/rok a není u nich možné použít SCR nebo SCNR, je emisní limit 340 mg/m³.

⁽³⁾ Platí pro zařízení, která se provozují méně jak 500 h/rok a jejich uvedené hodnoty jsou pouze orientační.

⁽⁴⁾ Nejnižší možná hranice rozsahu platí, jestliže je považována za dosažitelnou pro u metody SCR.

⁽⁵⁾ Pro kotle se spalováním ve fluidním loži, která byla uvedena do provozu nejpozději 7. ledna 2014. Dále pro kotle s práškovým spalováním hnědého uhlí je 175 mg/m³.

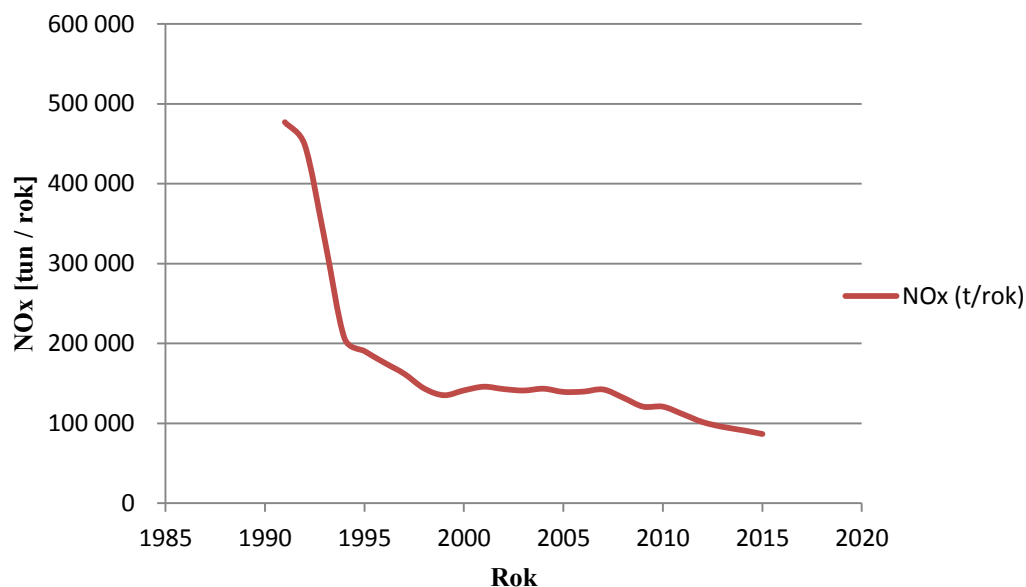
⁽⁶⁾ Pro kotle se spalováním ve fluidním loži, která byla uvedena do provozu nejpozději 7. ledna 2014. Dále pro kotle s práškovým spalováním hnědého uhlí je 220 mg/m³.

⁽⁷⁾ Pro zařízení, která byla uvedena do provozu nejpozději 7. ledna 2014 je jejich horních emisní limit 200 mg/m³ a jejich provoz je větší jak 1500 h/rok. Pro zařízení, kde jejich provoz je menší jak 1500 h/rok je pak emisní limit 220 mg/m³.

3.3 NO_x v České republice

V následujícím grafu je znázorněno postupné snižování NO_x v České republice od roku 1989 do 2015 stacionárních zařízení určených ke spalování paliv o tepelném výkonu vyšším než 5 MW. Hodnoty vyplývají z Českého statistického úřadu. [12]

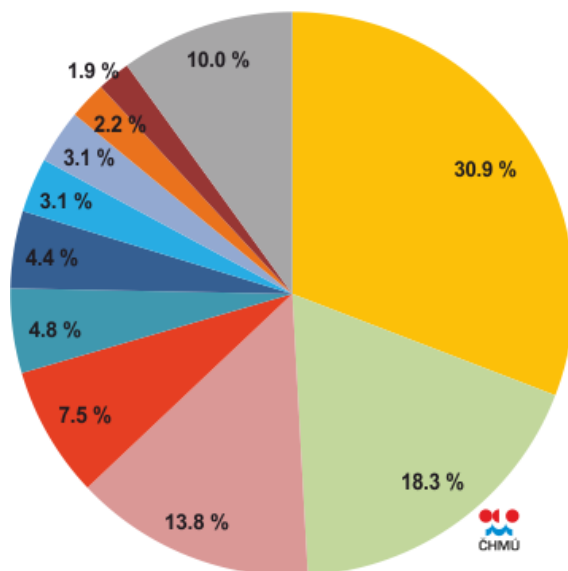
NO_x v České republice



Graf č.2 Postupné snižování NO_x v ČR u stacionárních zařízení větších, než 5MW

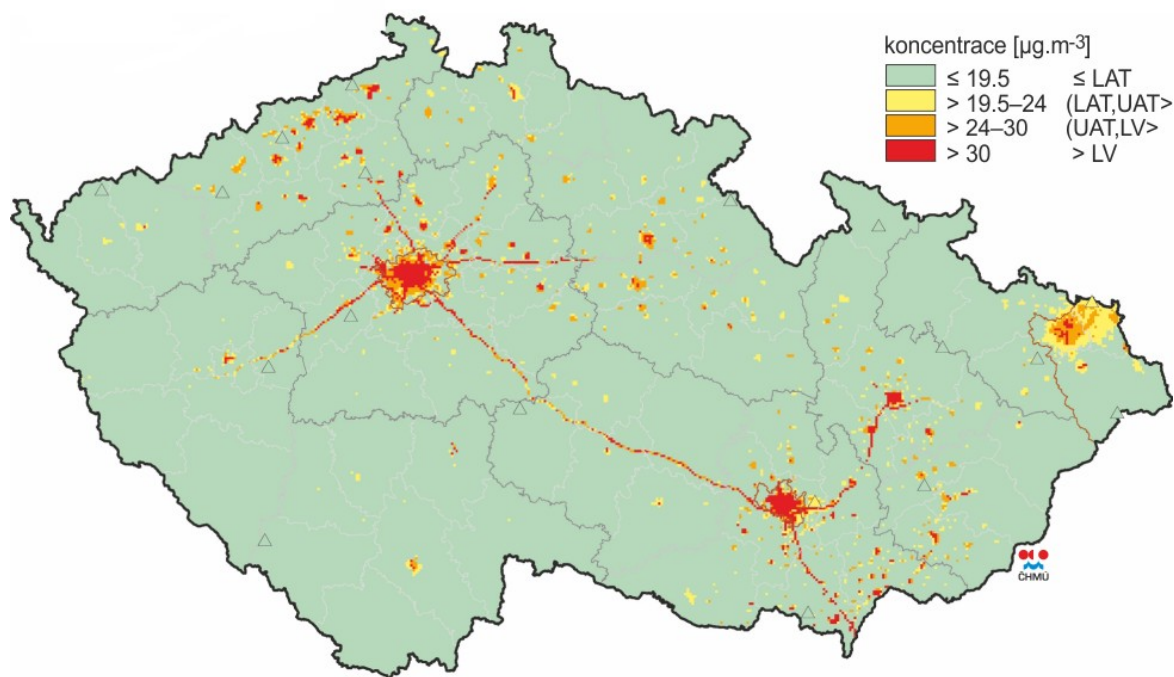
Dle webových stránek z Českého hydrometeorologického ústavu z roku 2015 vyplývá, že největší množství emisí NO_x pochází z dopravy a to z podílu 39,6%. Ty se skládají z nákladní dopravy nad 3,5 t, osobních automobilů, zemědělství, lesnictví a rybolovu - jedná se převážně o nesilniční vozidla. Druhým největším producentem NO_x je veřejná energetika a výroba tepla, a to 30,9%. Dalšími producenty jsou chemické průmysly, lokální vytápěné domácnosti, různé služby/instituce. Podílí se malým množstvím a to necelých 5% u každého producenta.

- 1A1a - Veřejná energetika a výroba tepla
- 1A4cii - Zemědělství, lesnictví, rybolov: Nesilniční vozidla a ostatní stroje
- 1A3biii - Silniční doprava: Nákladní doprava nad 3,5 tuny
- 1A3bi - Silniční doprava: Osobní automobily
- 1A2f - Spalovací procesy v průmyslu a stavebnictví: Minerální nekovové produkty
- 1A4bi - Lokální vytápění domácností
- 1A4ai - Služby / instituce: Stacionární spalovací zdroje
- 1A2c - Spalovací procesy v průmyslu a stavebnictví: Chemický průmysl
- 1A1c - Zpracování uhlí (brikety, koks, zplyňování)
- 1A2a - Spalovací procesy v průmyslu a stavebnictví: Železo a oce
- Ostatní



Obrázek č. 2 Podíl jednotlivých sektorů na emisích NO_x v ČR v roce 2016, Zdroj: [12]

Výskyt produkce emisí dusíku, které jsou na následujícím obrázku, vyplývá, že největší koncentrace je v oblasti dálnic a velkých měst, jako je Praha, Brno, Ostrava či Olomouc a v krajích Moravskoslezský a Ústecký.



Obrázek č. 3 Průměrná roční koncentrace NO_x v ČR v roce 2016, Zdroj: [12]

4 Způsoby snižování emisí NO_x

Pro úspěšné dosáhnutí garančních emisních limitů NO_x je potřeba dalších opatření. Produkci NO_x výrazně ovlivňuje jednotlivý typ kotle, jeho stav a také konstrukce. I přesto nejsme schopni nicméně dosáhnout stávajících limitů a ty jsou méně než 200 mg/m³. Proto je potřeba dalších opatření a ty jsou primární a sekundární.

Typ kotle	Emise NO _x [mg/m ³]
Plynové	240 - 1400
Olejové	500 - 1500
Granulační	800 - 1700
Výtavné	1600 - 2000
Fluidní	400 - 800

Tabulka č.3 Produkce NO_x u jednotlivých zařízení, Zdroj: [10]

4.1 Primární opatření

Slouží k omezení ještě nevzniklých oxidu dusíků NO_x. Jeho instalací se dosahuje snížení oxidu dusíku na hodnotu 320 - 380 mg/m³, to nicméně závisí na spoustě faktorů.

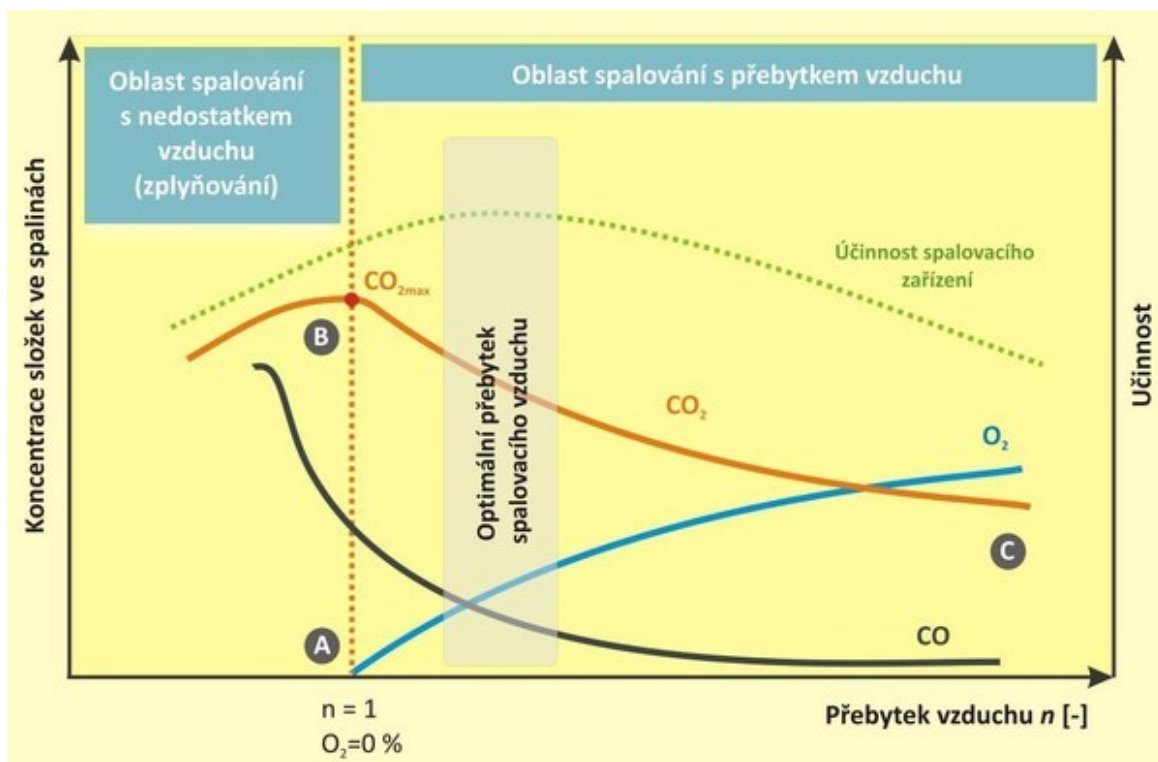
Snížení NO_x docílíme následovně: [1]

Jemností mletí paliva

Tato metoda se vyskytuje převážně u fluidních a roštových kotlů. Dochází k namletí paliva až do formy prášku. Zároveň dochází k rychlejšímu vysušení paliva. Díky namletí paliva se také zvyšuje reakční povrch paliva a tudíž urychlení reakce zapálení. Nicméně jemnost mletí má určitou hranici, kdy od určité jemnosti již nedochází k ovlivnění tvorby NO_x. [1]

Snížením přebytku vzduchu

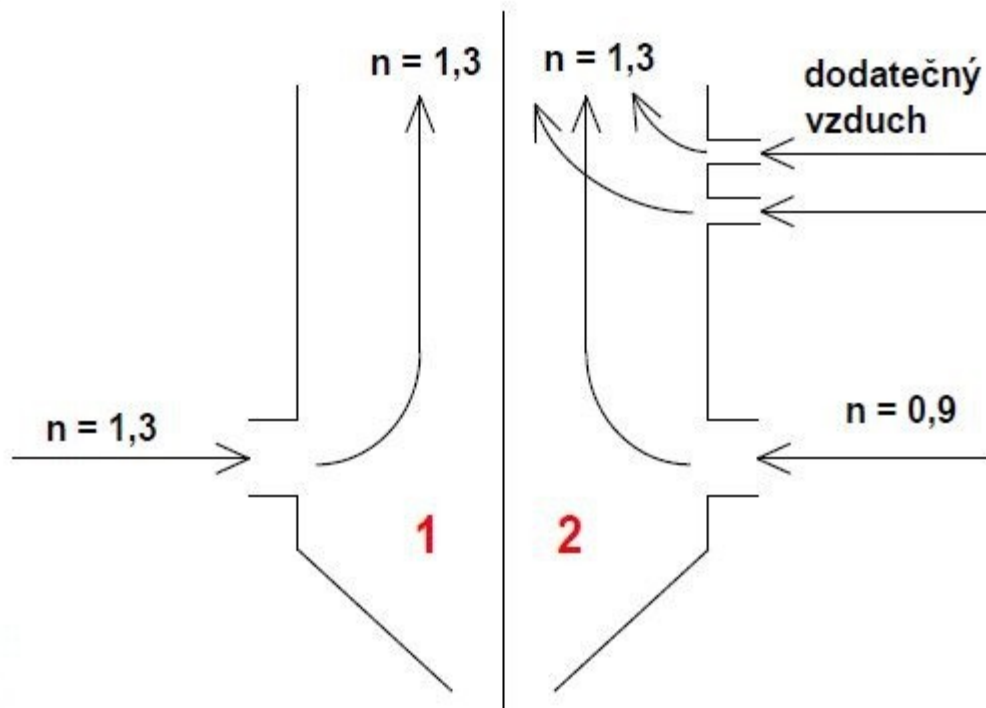
Patří mezi jednoduché implementované metody za účelem redukce NO_x . Tím, že snížíme přebytek spalovacího vzduchu na takovou hodnotu, aby došlo k úplnému dohoření paliva, dochází také k snížení konverze dusíku, které se váže na palivo a tím snižujeme termické NO_x . Díky této metodě dojde ke značnému snížení v případě starších elektráren. U nových elektráren obecně platí, že jsou vybaveny různými měřícími a řídicími systémy, které umožňují jejich optimální nastavení přívodu spalovacího vzduchu. Výhodou této metody je, že není potřeba žádných energetických zařízení. Dále je to snížení SO_3 , které způsobuje korozi a znečištění na přehříváku vzduchu a na dalších řídicích zařízeních kotle. Nicméně jestliže je překročena redukce, tak nemusí dojít k úplnému vyhoření paliva a zvýšení hodnoty CO_2 . Výsledkem může být nižší účinnost kotle, struskování, koroze a celkový výkon kotle. U této metody je potřeba dodržení přísné kontroly systému, aby nedošlo ke vzniku požáru ve vzduchových přehřívácích a v násypce.



Obrázek č.4 Vliv přebytku spalovacího vzduchu na účinnost a kvalitu spalování, Zdroj: [9]

Odstupňováním spalovacího vzduchu

Tato metoda je založena na vytvoření dvou rozdílných spalovacích zón. Primární spalovací zóna (70 - 90% spalovacího vzduchu s palivem) je charakterizována nedostatkem vzduchu a sekundární spalovací zóna (10 - 30% spalovacího vzduchu s palivem) s menším přebytkem vzduchu tak, aby došlo ke kompletnímu vyhoření paliva. Stupňování snižuje množství spalovacího vzduchu v primární spalovací zóně. Podstechiometrické spalování v primární zóně má za následek potlačení reakce kyslíku se vzduchem a tím zamezení tvorby NO_x . Z důvodu snížení teplotní úrovně plamene se snižují také termické NO_x . V sekundární zóně by mělo dojít k vyhoření celého paliva a tím zabránit vytvoření vyšších hodnot NO_x . [1]



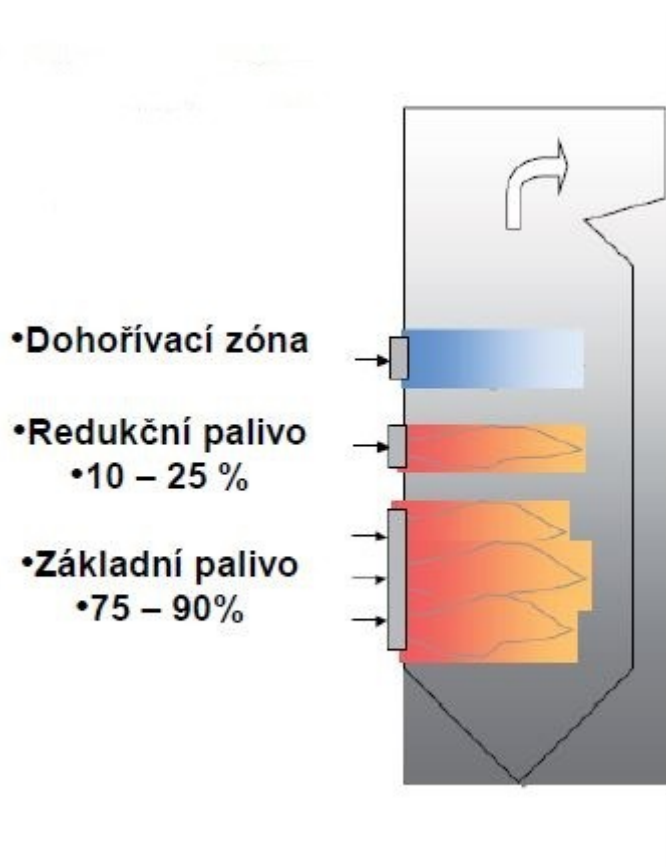
Obrázek č.5 Postupný přívod spalovacího vzduchu, Zdroj: [10]

Rovnoměrným dávkováním paliva k jednotlivým hořákům a jejich odstupňováním

Palivo je rovnoměrně dopravováno k jednotlivým hořákům za účelem optimálního spalování ve všech částech spalovacího zařízení, ale v dostatečné vzdálenosti od stěn ohniště tak, aby u stěn byla kyslíková atmosféra. Jako možné technické provedení

VŠB - TUO, Katedra energetiky; Rekonstrukce kotle K9 za účelem dodržení nových emisních limitů

je ohniště s tangenciálními hořáky. To má za následek zamezení případné koroze stěn a struskování ohniště v určitých oblastech. Toto řešení také spočívá v odstupňování přívodu paliva. Do spodní části kotle by se měla přidávat bohatá směs paliva, kde nám zajistí 75 - 90% tepelného výkonu. Ve střední části spalovacího zařízení poté tzv. chudá směs v množství takovém, aby nám zajistilo 10-25% tepelného výkonu. Ve vyšší úrovni spalovacího zařízení by měly být pouze dohořívací trysky, které mají za úkol dokonalé vyhoření paliva, které proudí ze spodní části spalovacího zařízení a snížení teploty ve vyšší úrovni - tedy snížení NO_x . [1]



Obrázek č.6 Odstupňování dávkování paliva, Zdroj: [10]

Konstrukcí a uspořádáním nízkoemisních hořáků (Low- NO_x)

Jako konstrukci hořáků myslíme jejich lepší nasměrování ve spalovací komoře a také jejich vertikálním rozložením. Výhodou těchto hořáků je možnost levnější instalace do již stávajícího spalovacího zařízení bez náročných konstrukčních úprav. Samozřejmostí jsou také lepší technické parametry a v neposlední řadě je to nízký nedopal a dlouhá životnost hořáků (minimálně 8 let). [1]

Nízkoemisní hořáky mají za úkol modifikaci prostředků pro zavedení spalovacího vzduchu a paliva. U těchto hořáků bylo dosaženo úmyslného pomalejšího

VŠB - TUO, Katedra energetiky; Rekonstrukce kotle K9 za účelem dodržení nových emisních limitů

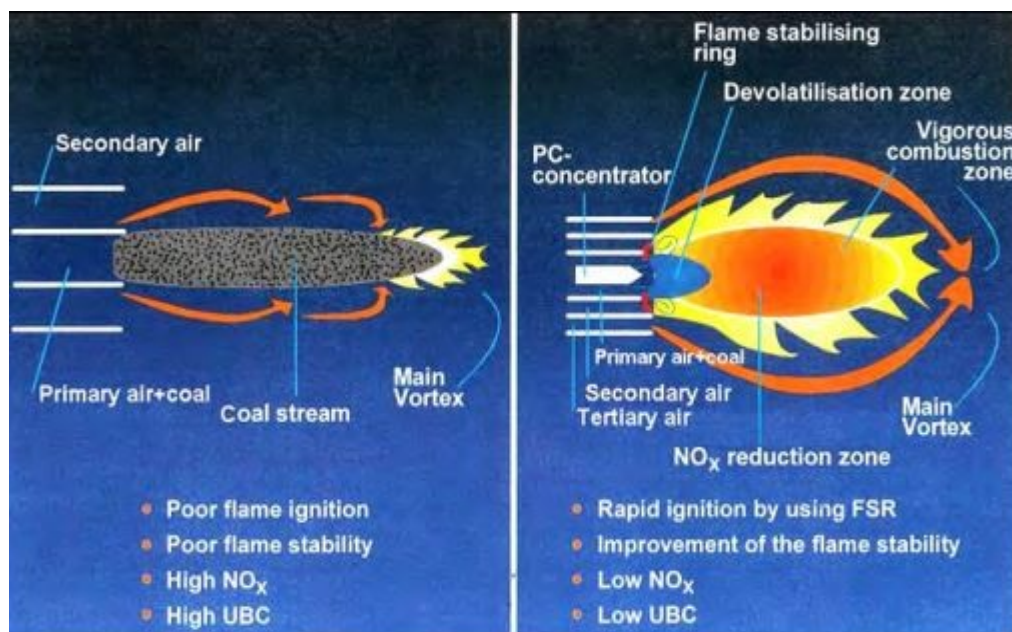
míchání, snížení koncentrace kyslíku a snížení teploty plamene v ústí hořáků - tedy snížení termických NO_x . Spalování tedy probíhá dál od ústí hořáků. LNB hořáky mají primární, sekundární a terciální přívod vzduchu. Technika spalování pomocí LNB vyžaduje instalaci dohořivacích trysek OFA vzduchu. Jestliže jsou stávající hořáky postarších typů, tak téměř vždy je výměna hořáků nákladově efektivní. Pro příklad LNB s dohořivacími trysky OFA vzduchu pro 250 MW kotel stojí přibližně 1,7 miliónů eur. Nicméně je dobré podotknout, že touto investicí se zredukují emise NO_x v peněžité hodnotě přibližně 500 eur za tunu. [1]

LNB lze rozdělit dle tří typů a to:

• Tzv. Air-staged low NO_x burner

U těchto typů se primární vzduch mísí s palivem, což vytváří bohatou směs. Nicméně teplota plamene není vysoká a má nedostatek kyslíku. U sekundární směsi se vytváří podstechiometrickou spalovací zónu. Vnitřní recirkulační zóna je vytvořena díky sekundárnímu vzduchu a kuželovému otvoru hořáku, která ohřívá rapidně palivo. Víření sekundárního plamene je důležité pro stabilitu plamene.

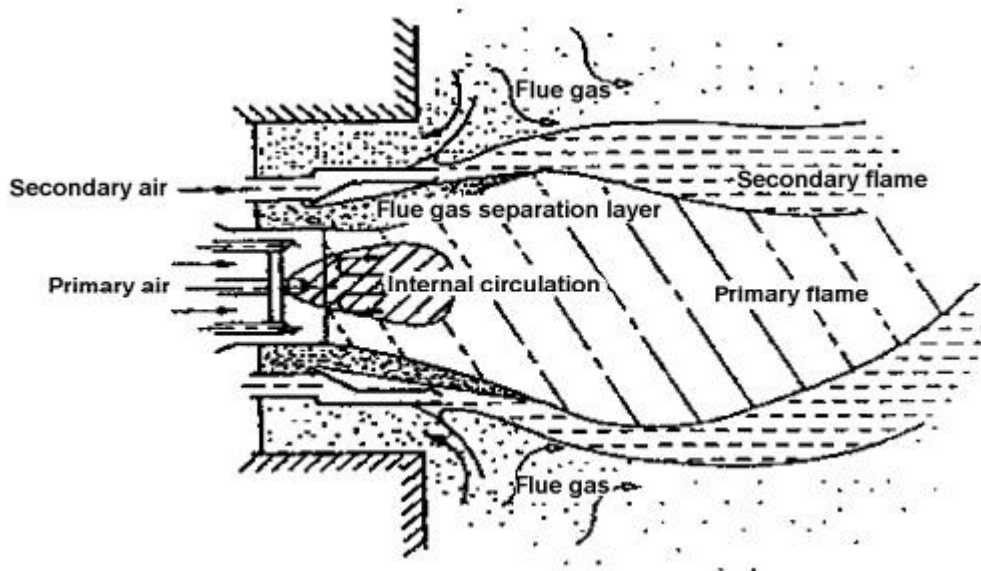
Prchavé látky se uvolňují v primárním plameni společně s hlavní částí sloučenin dusíku. V důsledku kyslíkové atmosféry a vysoké koncentrace CO je oxidace sloučenin dusíku na NO omezena. Společně s sekundárním vzduchem vzniká dohořivací zóna, ve které dochází ke spálení zbytku paliva při nízkých teplotách. Poté nízké koncentrace kyslíku O_2 zajišťují omezení emisí NO_x . [1]



Obrázek č.7 Air-staged low NO_x hořáky, Zdroj: [1]

- **Flue-gas recirculation low NO_x hořáky**

Funkce tohoto hořáku je podobná tomu výše zmíněnému, ale vzdálenost mezi primární a sekundární tryskou je větší, a proto se rozvíjí vrstva spalín. U těchto typů hořáků je 15 - 25% horkých spalín recirkulováno spolu s spalovacím vzduchem do vyhořelého vzduchu. Spaliny zde mají za úkol redukovat teplotu plamene a parciální tlak kyslíku, čímž se snižují hodnoty NO_x . Vnitřní recirkulace je zpravidla provozována za pomoci kapalných paliv nebo v poslední generaci kombinovaných plynových/olejových.



Obrázek č.8 Air-staged low NO_x hořáky, Zdroj: [1]

Recirkulace spalín

Recirkulaci spalín můžeme rozdělit dle typu zpětného nasávání spalín, a to na recirkulaci vnější a vnitřní. Při použití vnější recirkulace jsou spaliny za pomoci spalínového ventilátoru dopravovány k sání hořáku. Pro vnitřní recirkulaci není potřeba spalínových ventilátorů, nicméně je potřeba optimálního konstrukčního řešení hořáků, aby byl zajištěn přívod spalín. Mezi hlavní důvody proč recirkulujeme spaliny jsou snížení obsahu kyslíku v plameni a zároveň také snížení teploty. Touto metodou lze snížit obsah dusíku až o 50%.

Redukce ohřevu spalovacího vzduchu

Teplota předehřevu spalovacího vzduchu má významný vliv na tvorbu emisí NO_x . To zejména u spalování plynu a ropy. U těchto paliv je velká závislost na tvorbě termických NO_x na teplotě spalování. Snížením předehřevu vzduchu docílíme nižší teploty plamene ve spalovacím systému.

U této metody jsou dva hlavní nedostatky, a to, že u několika kotlů je vysoká teplota spalování potřebná a proto předehřev spalovacího vzduchu je nezbytný ke správné funkci spalovacího zařízení. Jako druhý nedostatek je ten, že při snížení teploty předehřívaného vzduchu dochází ke vyšší spotřebě paliva a to proto, že část tepelné energie je potřebná na předehřev paliva.

4.1.1 Celkové shrnutí snižování NO_x pomocí primárního opatření

Primární opatření		Účinnost redukce NO_x	Obecné použití	Omezenost použití
Snížení přebytku vzduchu		10 - 44%	Všechna paliva	Nedokonalé vyhoření paliva
Odstupňování spalovacího vzduchu	BOOS	10 - 70 %	Většinou pro plyné a kapalné elektrárny s dodatečným vybavením	Nedokonalé vyhoření paliva (tím pádem vysoká koncentrace CO a nedopálena uhlíková vrstva)
	BBF		Všechny elektrárny s dodatečným vybavením	
	OFA trysky		Všechna paliva	
Recirkulace spalin		20 - 50% <20% pro uhelné elektrárny; 30-50% pro plyné elektrárny s OFA trysky	Všechna paliva	Nestabilita hoření
Redukce ohřevu spalovacího vzduchu		20 - 30%	Nevhodné pro spalovací kotle na spalování uhlí	-
Odstupňování hořáků a jejich dávkování paliva		50 - 60% (70 - 80% NO_x může být zredukováno v	Všechny paliva	-

		primární zóně)		
Nízkoemisní hořáky (Low-NO _x burner - LNB)	Air-staged LNB	25 - 35%	Všechny paliva	Nestabilita hoření a nedokonalé vyhoření paliva
	Flue-gas recirculation LNB	do 20%	Všechny paliva	Nestabilita hoření
	Fuel-staged LNB	50 - 60%	Všechny paliva	Nestabilita hoření a nedokonalé vyhoření paliva

Tabulka č.4 Celkové shrnutí snižování NO_x pomocí primárního opatření Zdroj: [1]

4.2 Sekundární opatření

Toto opatření spočívá v chemickém omezení či odstranění již vzniklých oxidu dusíků NO_x ze spalin. Jelikož nejsme schopni při použití primárního opatření snížit oxidy dusíků na garanční hodnoty, je potřeba instalace sekundárního opatření a tím by se mělo dosáhnout potřebných hodnot oxidu dusíků, ve většině případů je to limit pod 200 mg/m³. Všechny metody u sekundárního opatření spočívají v reakci iontů NH₂- s NO za vzniku molekulárního dusíku N₂ a vody H₂O.

Mezi hlavní metody patří:

- selektivní katalytická redukce - SCR
- selektivní nekatalytická redukce - SNCR
- další technologie, jako jsou suché a polosuché metody, mokré procesy a jiné dočišťovací metody, která mají za úkol snížit oxidy dusíku a síry

Instalaci těchto opatření lze dosáhnout vyšší účinnosti - u SNCR je to 40 - 60% a u SCR je vyšší, než 90%. Nicméně je nutné podotknout jejich vyšší investiční náklady, než u primárního opatření. [1]

4.2.1 Selektivní katalytická redukce - SCR

Je založena na principu redukce oxidu dusíku za pomoci čpavku při teplotě 320 - 400 °C. Princip spočívá v tom, že čpavek, tedy NH₃ se vstřikuje ještě před katalyzátorem soustavou trysek uspořádaných ve spalínovém kanálu. Poté čpavek v katalyzátoru zreaguje se spalinami a výsledkem jsou přirozené složky atmosféry, jakými jsou dusík H₂ a voda H₂O. Touto metodou by se mělo dosáhnout hodnot NO_x pod 200 mg/m³. Jak už je zmíněno dříve, tato metoda vyžaduje velké investiční náklady, tudíž pro snížení těchto

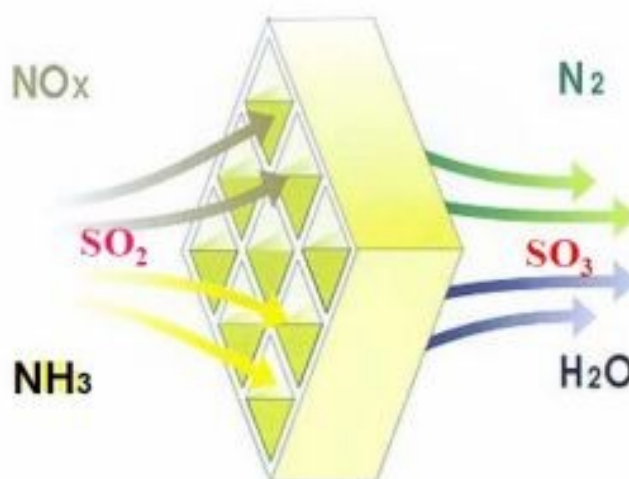
VŠB - TUO, Katedra energetiky; Rekonstrukce kotle K9 za účelem dodržení nových emisních limitů

finančních nákladů je potřeba provést co nejúčinnější primární opatření a tím pádem snížit tak vstupní hodnotu NO_x do SCR. Pro dosažení největší účinnosti, tedy vyšší, než 90% je potřeba nalézt správné teplotní okno a zajistit co nejmenší přebytek redukční látky.

Jako další krok je potřeba také dodržovat postupnou rychlost spalin v katalyzátoru a to je 4 - 8 m/s a to z toho důvodu, aby proběhla správně reakce.

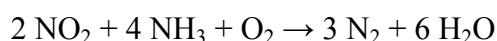
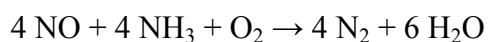
Jako zdroj redukčního činidla lze použít tyto látky:

- čpavková voda NH_4OH , mezi 25 - 30 % roztok
- močovina $(\text{NH}_2)_2\text{CO}$
- kyanomočová kyselina $(\text{HNCO})_3$

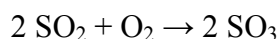


Obrázek č.9 Princip metody SCR, Zdroj: [16]

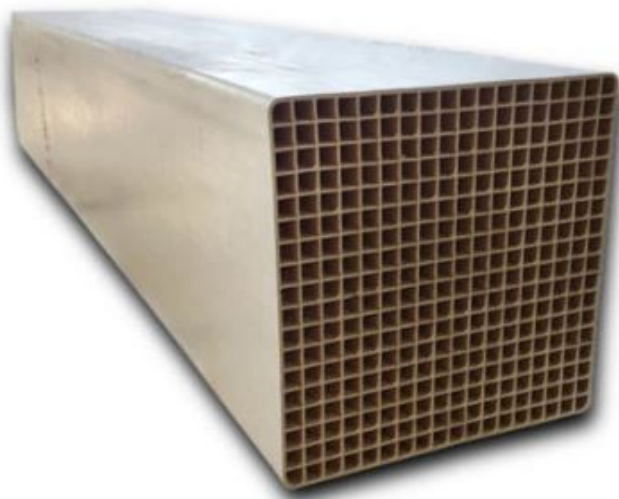
Rovnice popisující SCR



Rovnice vedlejšího efektu



Jako vedlejší efekt při použití SCR je vznik oxidu sírového SO_3 , který vzniká reakcí kyslíku s oxidem siřičitým. Snadno se hydratuje na aerosol kyseliny sírové H_2SO_4 a tím se podílí na vzniku kyselých dešťů.[13]



Obrázek č.10 Katalyzátor LJGT000 pro metodu SCR, Zdroj: [14]

Na katalyzátory a jejich nosiče se kladou velmi vysoké nároky z toho důvodu, že musí mechanicky obstát v těžkých podmínkách provozu, tj. usazování popílku v katalyzátoru a plyny, které obsahují oxidy síry.

Životnost katalyzátoru je omezená a převážně závisí na typu paliva. Při spalování tuhých paliv pouze 3 roky a při spalování plyných paliv přibližně 6 - 7 let. Tento problém je vyřešen tak, že katalyzátor je rozdělen do několika vrstev, kde poslední vrstva se po určité době odebere a nahradí se novou.

Katalyzátory jsou většinou vyráběny na bázi oxidu vanadičného V_2O_5 a jejich nosiče z oxidu titaničitého TiO_2 . Tyto materiály disponují dobrou stabilitou i při špatných podmínkách a dobrou efektivitou. Někdy je také podporován oxidy wolframového WO_3 a molybdenového MoO_3 . Ty mají za úkol ochránit katalyzátor od tzv. "katalytických jevů" a zvětšit teplotní okno. Optimální teplota pro vanadové katalyzátory je $350^\circ C$. Při nižší teplotě klesá účinnost a při vyšších teplotách vznikají problémy s korozí.

Proti usazování popílku, který nám způsobuje abrazi a tím pádem snižuje účinnost katalyzátoru, lze zasáhnout pomocí konstrukčního řešení a to vertikální proudění spalin. V dalším případě to mohou být různé oklepy či ofuky. [1].

Selektivní katalytickou redukcí (SCR) lze rozdělit následovně:

- **Nízkoteplotní SCR**

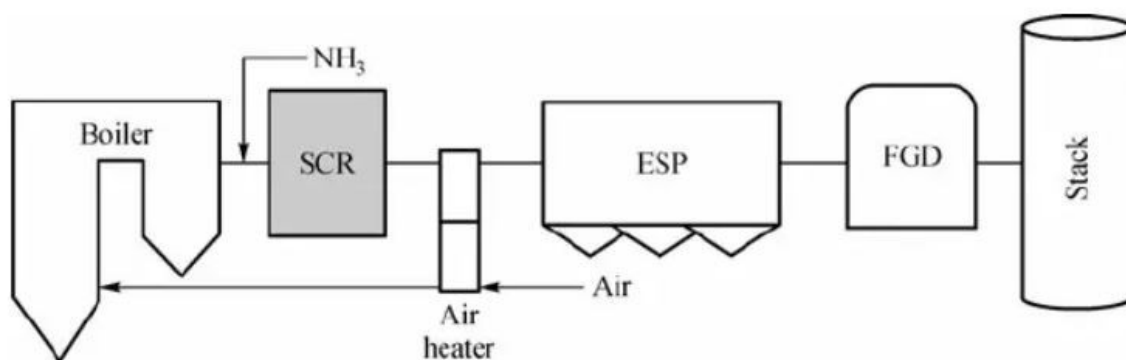
Probíhá do teploty 150°C. Tato metoda je méně používaná a to z toho důvodu, že katalyzátory nemají dostatečnou spolehlivost a účinnost. Je tedy stále ve fázi vývoje. Tedy, místo tohoto používáme výhodnější metodu a to SCR založenou na aktivním koksu.

- **Vysokoteplotní SCR**

Tato metoda probíhá mezi v teplotním rozmezí 300 - 450°C a je rozdělena do tří typů provedení. Jsou to High Dust, Low dust and Tail End.

High-Dust metoda

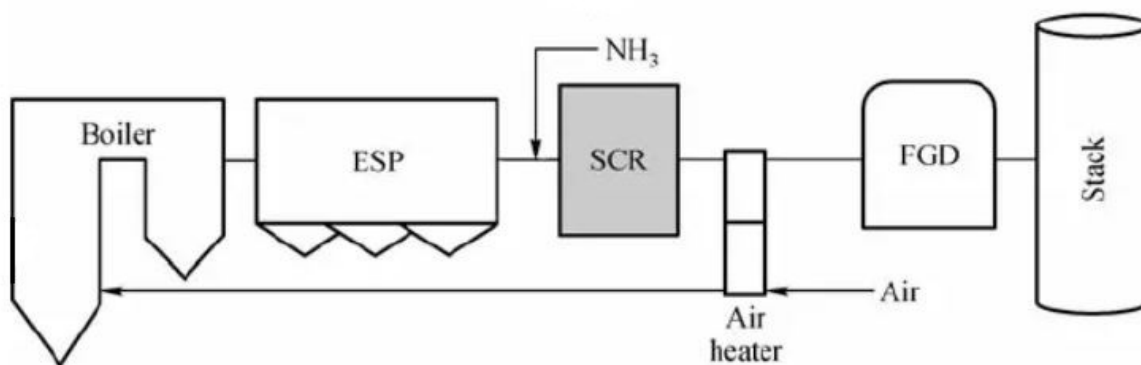
V dnešní době je to nepoužívanější SCR metoda. Bývá většinou umístěna mezi ekonomizérem a ohřívákem vzduchu a vyznačuje se velkým obsahem tuhých částic a vyšší teplotou spalin. Proto tedy dochází k vyšší abrazi než u ostatních metod. Je tedy potřeba častější výměna katalyzátoru a jeho větší otvory. Teplotní pole je u této metody 320 - 400°C. Hlavní výhodou u této metody je menší závislost na provozu kotle, to znamená, že do provozu kotle nemusí po instalaci katalyzátorů zasahovat. Účinnost je přibližně 80%. [1]



Obrázek č.11 Grafické znázornění metody High Dust, Zdroj: [16]

Low-Dust metoda

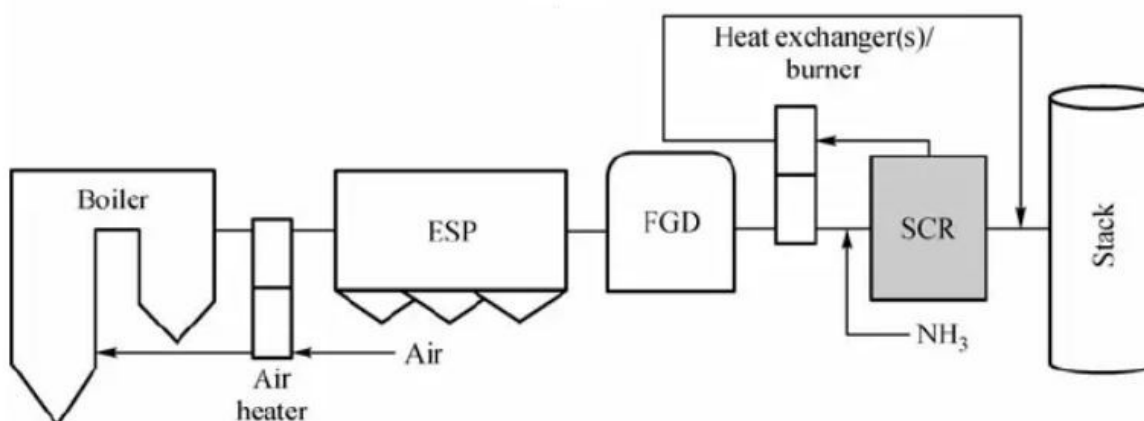
Umístění katalyzátoru u této metody je za elektrostatickým odlučovačem. Použití této metody je u paliv s vyšším podílem popela. Výhodou této metody je delší životnost jelikož větší množství paliva je již zachyceno v elektrostatickém odlučovači. Pro zajištění správné funkčnosti katalyzátoru je potřeba dostatečná paliva, tedy buďto regulace za pomoci ekonomizéru, či ohřevu pomocí spalin.



Obrázek č.12 Grafické znázornění metody Low Dust, Zdroj: [16]

Tail-End metoda

Katalyzátory jsou umístěny až za odsiřením spalín. Ty mají teplotu přibližně 80°C za výstupem, proto je nutný ohřev na požadované teplotní okno aby v katalyzátorech proběhla správná reakce. To se tedy jeví jako největší nevýhoda u této metody. Pro ohřev je používán regenerační výměník typu Ljungström, či ohřev pomocí plynového hořáku. Ohřev spotřebuje až 4% výkonu. Výhodou této metody jsou menší zástavbové rozměry, což je projeví na menší finanční investici.



Obrázek č.13 Grafické znázornění metody Tail-End, Zdroj: [16]

4.2.2 Selektivní nekatalytická redukce - SNCR

Tato metoda je založena na principu vytvoření redukčních podmínek, kde do spalín na výstupu z ohniště je vstřikován speciální roztok. Jako speciální roztok je většinou použit na bázi čpavku, ať už se tedy jedná o např. o močovinu, čpavek nebo čpavkovou vodu. Účinnost snížení NO_x u této metody je až 50% a vyznačuje se charakteristickým teplotním oknem v oblasti 850 - 1050°C. Při použití se snažíme dosáhnout vždy nejvyšší hodnoty redukce NO a tím pádem únik čpavku (NH_3) je malý. Jestliže je použití u menších teplot

VŠB - TUO, Katedra energetiky; Rekonstrukce kotle K9 za účelem dodržení nových emisních limitů
proces redukce vyžaduje delší reakční dobu - tu ale nicméně nejsme zajistit. Tím se tedy redukce NO zhoršuje a únik čpavku je větší.

Jestliže je dosaženo teplot výrazně vyšších, než 1050°C se redukce NO zhoršuje a to z toho důvodu, že je výrazné zlepšení oxidační reakce čpavku s NO a to působí proti redukcí a emise se mohou dostat na původní hodnoty. V praxi to znamená, že je potřeba nastavit teplotu vyšší, než je optimální teplotní okno.

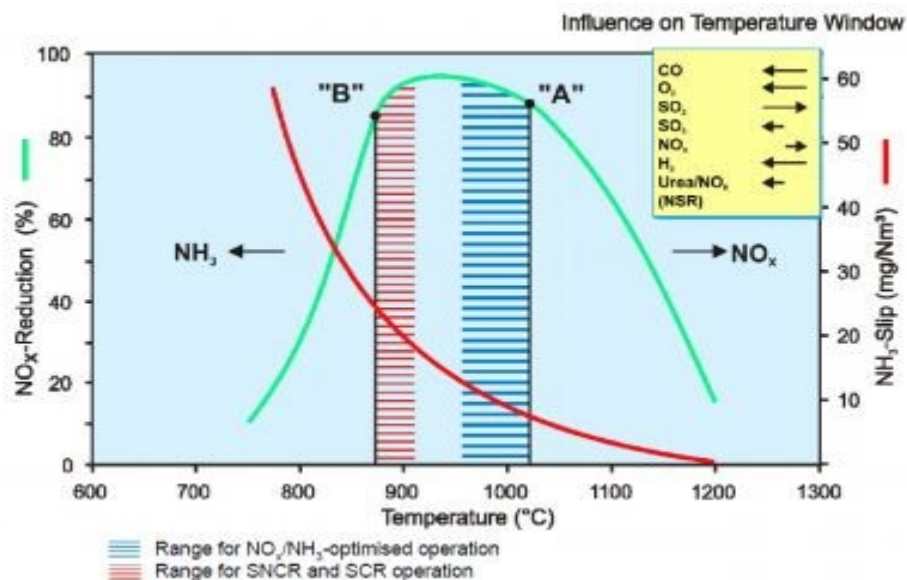
Aby bylo možné dosáhnout účinnosti aspoň 50%, je potřeba vstříkovat roztok na více úrovních a použít vhodných redukčních činidel.

Pro docílení co nejmenších investičních a provozních nákladů je potřeba co nejlépe a nejdříve realizovat dostupná primární opatření, čímž docílíme snížení hodnot NO_x před vstupem do SNCR.

U zařízení SNCR platí jednoduchá instalace a nezabírá příliš prostoru. Dále má SNCR nízkou míru redukce, tudíž může být použita samostatně v kotlích, které již mají nízkou úroveň emisí. Tato metoda nicméně není vhodná pro kotle s variabilním zatížením nebo proměnlivou kvalitou paliva.

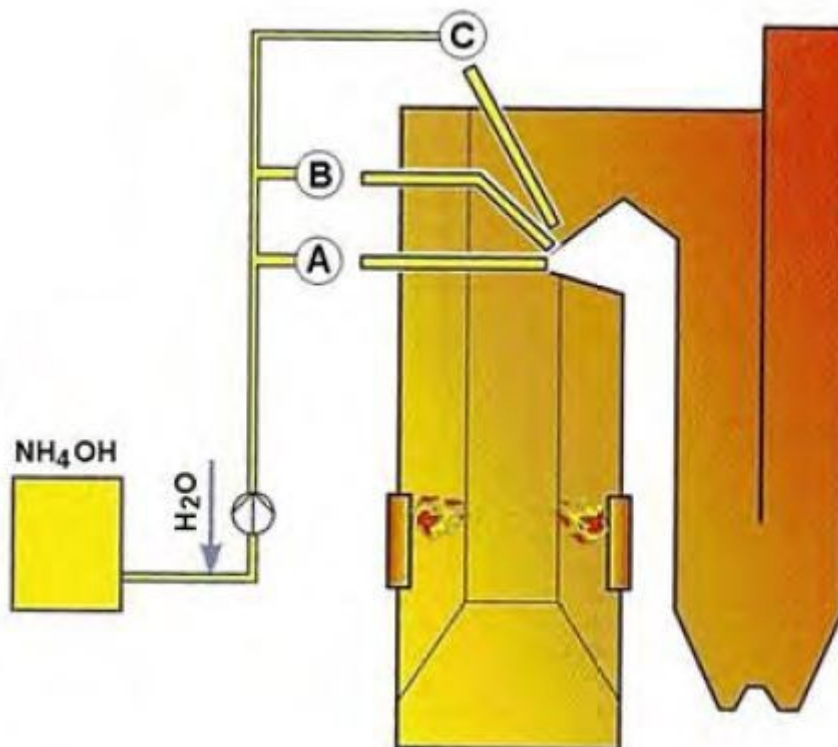
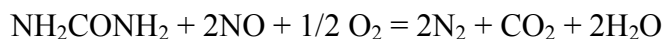
Močovina je častěji používaná pro spalovací zařízení menší, než 50MW. Výhodou této látky je, že nedochází k žádnému dopadu na zdraví člověka. Naopak amoniak je velice škodlivý, proto s ním musí být zacházeno opatrně a skladování musí být zabezpečeno v případech úniku. Musí být také instalováno detekční zařízení pro zjištění koncentrace amoniaku v okolí. Skladuje se buďto jako vodní roztok či kapalina o tlaku 17 baru a teplotě 20°C .

Na následujícím obrázku je znázorněna závislost odloučení NO_x na teplotě spalin. Oblast, která je vyšráfovaná modře znázorňuje optimální provoz metody SNCR. Červená oblast znázorňuje optimální provoz pro metodu SNCR a SCR dohromady.



Obrázek č.14 Závislost odloučení NO_x na teplotě spalin Zdroj: [17]

Obecná chemická reakce redukce NO ve spalinách je popsána následovnou rovnicí:



Obrázek č.15 Technologie SNCR Zdroj: [1]

4.2.2.1 Shrnutí SCR a SNCR metody

Sekundární opatření	Účinnost snížení NO _x	Další výkonnostní parametry	
		Parametr	Hodnota
Selektivní katalytická redukce (SCR)	80 - 95%	Teplotní okno	320 - 400°C (high-dust) 170 - 300°C (tail-end)
		Redukční činidlo	Amoniak, močovina
		NH ₃ skluz	< 5mg Nm ³
		Zastavěný prostor	větší
		Investiční náklady	100 %
		Provozní náklady	nižší
		SO ₂ /SO ₃ účinnostní přeměna	1,0 - 1,5 % (tail-end)
Selektivní nekatalytická redukce (SNCR)	30 - 50%	Teplotní okno	850 - 1050°C
		Redukční činidlo	Amoniak, močovina
		NH ₃ skluz	< 10mg Nm ³
		Zastavěný prostor	menší
		Investiční náklady	20 %
		Provozní náklady	vyšší
		SO ₂ /SO ₃ účinnostní přeměna	1,5 - 2,5 %

Tabulka č.5 Shrnutí SCR a SNCR metody Zdroj: [1]

4.3 Emisní limity pro kotel K9

S nedávným rozhodnutím Ministerstva životního prostředí bylo stanoveno, že do 30.6.2020 musí kotle o jmenovitém tepelném příkonu větším než 50MW splňovat přísnější podmínky ohledně emisních limitů, a to:

VŠB - TUO, Katedra energetiky; Rekonstrukce kotle K9 za účelem dodržení nových emisních limitů

Emisní zdroj	Látka nebo ukazatel	Emisní limity do 30.6.2020 [mg/m ³]	Vztažné podmínky
008 Kotel K8	TZL	50	6 % O ₂ A*
009 Kotel K9	SO ₂	1700	
	NO _x	500	
010 Kotel K10	CO	250	

Tabulka č.6 Emisní limity u K8, K9 a K10 do roku 2020 [8]

(Hodnoty se uvádí bez primárních a sekundárních opatření)

*A - Vztažné podmínky A pro emisní limit znamenají koncentraci příslušné látky za normálních podmínek (tlak p=101 325 Pa, teplota T=273,15 K)

5 Popis kotle K9

5.1 Technická data kotle a jeho stručný popis

Typ	strmotrubný kotel s granulační komorou
Rok uvedení do provozu	1999
Jmenovitý výkon kotle	200 t/h
Ekonomický výkon	170 t/h
Minimální výkon bez stabilizace	120 t/h
Tlak přehřáté páry	9,6 MPa
Teplota přehřáté páry	525 °C
Teplota napájecí vody	150 °C
Účinnost kotle	% dle projektu garančního měření
Odprášení / trvalá provozní odlučivost filtrů	elektrostatické filtry / 99,9 %
Jmenovitý tepelný výkon	154 MW

Tabulka č.7 Technická data kotle K9

Jedná se o dvoutahový kotel s přirozenou cirkulací. Granulační obdélníková spalovací komora je vyrobena z membránových stěn, které fungují jako výparník kotle. Kotel je zavěšen na nosném stropním roštu a dilatace probíhá směrem dolů. Přehřívák páry je čtyřstupňový, regulace je vstříková ve dvou stupních. Součástí kotle je také ohřívák napájecí vody a je dvoustupňový.

Ohniště má v každém rohu umístěny tři práškové hořáky a dva hořáky na koksárenský plyn pro stabilizaci, které slouží také jako zapalovací. V přední stěně spalovací komory jsou také dva brýdové hořáky.

Ve spalovací komoře je celkem dvanáct práškových hořáků, osm zapalovacích (stabilizačních) hořáků na koksárenský plyn, dva kombinované hořáky na vysokopecní a koksárenský plyn a nakonec dva brýdové hořáky umístěné v zadní stěně spalovací komory. Každý brýdový hořák má svůj zapalovací/stabilizační hořák na koksárenský plyn, který slouží k zapálení a stabilizaci hoření brýd při nájezdu kotle s prázdným zásobníkem.

Kotel je také vybaven dvěma axiálními sekundárními vzduchovými ventilátory pro dopravu sekundárního a terciárního vzduchu, který je předtím ohříván v trubkovém ohříváku vzduchu. Pro dopravu primární práškové směsi slouží dva radiální vzduchové ventilátory.

Příprava uhelného prášku probíhá v trubnatém mlýnu, prášek je dále tříděn v třídiči

VŠB - TUO, Katedra energetiky; Rekonstrukce kotle K9 za účelem dodržení nových emisních limitů

s možností regulace jemnosti mletí. Pro odloučení uhelného prášku jsou použity dva cyklóny. Ze zásobníku je následovně prášek podáván dvanácti podavači do práškových hořáků. Brýdy jsou mlýnským (brýdovým) ventilátorem odsávány a výtlačkem vháněny do brýdových hořáků kotle. Spaliny jsou čištěny ve dvou elektro-odlučovačích a odsávány dvěma axiálními spalinovými ventilátory.

Za kotlem je vyvedena recirkulace spalin, která vede do sání mlýnského ventilátoru.

Aby bylo dosaženo požadovaných limitů NO_x je kotel vybaven kromě nízkoemisních hořáků, dynamického třídiče, recirkulací spalin, odstupňování hořáku a poměrem palivo-vzduchu, také sekundární technologií na bázi takzvané selektivní nekatalytické redukce (SNCR).

5.2 Základní údaje paliva

5.2.1 Černé uhlí

Dodávky černé uhlí jsou z více oblastí, jedná se buďto o České černé uhlí dolů Lazy, Darkov, ČSM, ČSA či o Polské černé uhlí. Pro veškeré výpočty se používá takzvané garanční palivo z Dolu Lazy a jeho parametry paliva jsou následovné:

Výhřevnost paliva $Q_i^r = 23,691 \text{ MJ/kg}$

Obsah vody v surovém palivu $W^r = 0,17 \%$

Obsah popela v surovém palivu $A^r = 31,33 \%$

Prchavá hořlavina $V^{\text{daf}} = 31 \%$

Prvkové složení	Hrubý vzorek [%]
C	57,92
H	3,33
O	5,93
N	0,95
S	0,36
Cl	0,06

Tabulka č.8 Složení paliva

5.2.2 Vysokopecní plyn

Plyn, který je produkován ve vysokých pecích jako vedlejší produkt při výrobě surového železa. Jeho vznik probíhá pomocí nedokonalého spálení koksu a následným uvolněním oxidu uhličitého z vápence.

Jedná se o plyn, který dosahuje nízké výhřevnosti od 2,6 do 4,2 MJ/Nm³ a to z toho důvodu, že obsahuje malé množství hořlavých látek (do 30%) v palivu. Jeho velikou výhodou je velký obsah CO, který se dá použít jako redukce NO_x. Aby bylo docíleno co nejlepší účinnosti je nutný předehřev plynu, ale také vzduchu.

Vysokopecní plyn (BFG)		
M_{VP}	30000	Nm ³ /h
Q_i^r	2,95	MJ/Nm ³
Objemové složení		
H₂	3,2	%
O₂	0	%
N₂	55,3	%
CO₂	19,8	%
CO	21	%
H₂S	0	%
CH₄	0	%

Tabulka č.9 Složení vysokopecního plynu

5.2.3 Koksárenský plyn

Plyn, který vzniká jako vedlejší produkt při koksování černého uhlí. Je užití lze nalézt jednak při spalování, ale také k otopu koksárenských baterií a dalších otopů v hutích. Před jeho využitím je nutnost vyčištění od dehtu, benzolu a amoniaku. Je výhřevnost je daleko větší než u vysokopecního a to 16 MJ/Nm³. Jeho obdobou je svítiplyn.

Koksárenský plyn (COG)		
M_{VP}	6000	Nm ³ /h
Q_i^r	16	MJ/Nm ³
Objemové složení		
H₂	55	%

VŠB - TUO, Katedra energetiky; Rekonstrukce kotle K9 za účelem dodržení nových emisních limitů

O₂	0,5	%
N₂	9	%
CO₂	2,5	%
CO	5,5	%
H₂S	0,42	%
CH₄	25	%

Tabulka č.10 Složení koksárenského plynu

6 Stechiometrické výpočty

Cílem stochiometrických výpočtů je získání hodnot objemu vzduchu a vzniklého objemu spalín při spalování jednotkového množství daného paliva. Toho docílíme použitím takzvaných stochiometrických rovnic. V našem případě budou výpočty probíhat jako u vysokopecního a koksárenského plynu, tak i u černého uhlí.

Výsledná směs plynu se stanoví z koksárenského a vysokopecního plynu na základě jejich výhřevnosti a dodávaného množství do spalovací komory. Ta se následovně použije na následující výpočty.

Výsledná směs plynu COG a BFG		
M_{VP}	0,82	Nm ³ /s
M_{VP}	0,407	kg/s
Q_i^r	16906	MJ/Nm ³
Objemové složení		
H ₂	55,94	%
O ₂	0,66	%
N ₂	9,43	%
CO ₂	2,20	%
SO ₂	0	%
CO	5,59	%
H ₂ S	0	%
CH ₄	23,43	%
C _m H _n	2,75	%

Tabulka č.11 Složení výsledné směsi plynu

6.1 Výpočet objemů spalovacího vzduchu a spalín

6.1.1 Pro uhlí

$$V_{VS \min} = \frac{22,39}{0,2095} \left[\frac{C^r}{12,011} + \frac{H^r}{4,032} + \frac{S^r}{32,066} - \frac{O^r}{32,00} \right]$$

$$V_{VS \min} = \frac{22,39}{0,2095} \left[\frac{0,5792}{12,011} + \frac{0,0332}{4,032} + \frac{0,0036}{32,066} - \frac{0,0593}{32,00} \right]$$

VŠB - TUO, Katedra energetiky; Rekonstrukce kotle K9 za účelem dodržení nových emisních limitů

$$V_{VS \min} = 5,849 \text{ m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1}$$

$$V_{SS \min} = \frac{22,26}{12,011} \cdot C^r + \frac{21,89}{32,066} \cdot S^r + \frac{22,40}{28,016} \cdot N^r + 0,7905 \cdot V_{VS \min}$$

$$V_{SS \min} = \frac{22,26}{12,011} \cdot 0,5792 + \frac{21,89}{32,066} \cdot 0,0036 + \frac{22,40}{28,016} \cdot 0,0095 + 0,7905 \cdot 5,849$$

$$V_{SS \min} = 5,7071 \text{ m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1}$$

$$V_{S \text{ H}_2\text{O} \min} = 11,1111 \cdot H^r + 1,2433 \cdot W_t^r + (v - 1) \cdot V_{VS \min}$$

$$V_{S \text{ H}_2\text{O} \min} = 11,1111 \cdot 0,0332 + 1,2433 \cdot 0,0017 + (1,0060 - 1) \cdot 5,849$$

$$V_{S \text{ H}_2\text{O} \min} = 0,4061 \text{ m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1}$$

v – poměrná vlhkost je 1,0060, která byla určena při garanční zkoušce

$$V_{SV \min} = V_{SS \min} + V_{S \text{ H}_2\text{O}}$$

$$V_{SV \min} = 5,7071 + 0,4061$$

$$V_{SV \min} = 6,1132 \text{ m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1}$$

Složky stechiometrických objemů pro dokonalé spalování

$$V_{V \text{ CO}_2} = 0,0003 \cdot V_{VS \min} = 0,0003 \cdot 5,849 = 0,0018 \text{ m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1}$$

$$V_{V \text{ N}_2} = 0,7809 \cdot V_{VS \min} = 0,7809 \cdot 5,849 = 4,5674 \text{ m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1}$$

$$V_{V \text{ Ar}} = 0,0093 \cdot V_{VS \min} = 0,0093 \cdot 5,849 = 0,0543 \text{ m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1}$$

$$V_{S \text{ CO}_2} = \frac{22,26}{12,011} \cdot C^r = \frac{22,26}{12,011} \cdot 0,5792 = 1,0734 \text{ m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1}$$

$$V_{S \text{ SO}_2} = \frac{21,89}{32,066} \cdot S^r = \frac{22,26}{12,011} \cdot 0,0036 = 0,0024 \text{ m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1}$$

$$V_{S \text{ N}_2} = \frac{22,40}{28,016} \cdot N^r = \frac{22,26}{12,011} \cdot 0,0095 = 0,0076 \text{ m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1}$$

pro nedokonalé spalování:

$$V_{S \text{ CO}} = \frac{22,41}{12,011} \cdot C^r = \frac{22,41}{12,011} \cdot 0,5792 = 1,0806 \text{ m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1}$$

$$V_{O_2(C)} = \frac{22,39}{12,011} \cdot C^r = \frac{22,26}{12,011} \cdot 0,5792 = 1,0797 \text{ m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1}$$

6.1.2 Pro směs plynu

$$M_{sm} = \sum M_i \cdot \omega_i^r$$

$$M_{sm} = M_{N_2} + M_{O_2} + M_{CO_2} + M_{H_2} + M_{CO} + M_{CH_4} + M_{C_2H_6}$$

$$M_{sm} = 28,013 \cdot 0,0943 + 32 \cdot 0,0066 + 44,01 \cdot 0,0219 + 2,016 \cdot 0,5594 + 28,01 \cdot 0,0559 + 16,042 \cdot 0,2343 + 30,070 \cdot 0,0275$$

$$M_{sm} = 11,0957 \text{ kg} \cdot \text{kmol}^{-1}$$

Plyn	M _i
H ₂	2,016
N ₂	28,013
O ₂	32,000
CO ₂	44,010
CO	28,010
H ₂ S	34,076
SO ₂	64,060
NH ₃	17,031
H ₂ O	18,016
(C)	12,011
(S)	32,066
CH ₄	16,042
C ₂ H ₆	30,068

Tabulka č.12 Molární hmotnost plynů

Pro sjednocení výpočtů objemů při spalování plynu s tuhými palivy je výhodné přepočítat objemové složení spalovaného plynu na hmotnostní složení dle následujících vztahů:

$$C^r = \frac{M_C}{M_{sm}} \cdot (\omega_{CO_2}^r + \omega_{CO}^r + \sum m \cdot \omega_{C_{mH_n}}^r)$$

$$C^r = \frac{12,011}{11,0957} \cdot (0,022 + 0,0558 + \sum 2 \cdot 0,0275)$$

$$C^r = 0,3973 - \text{palivo je doplněno o uhlovodíky}$$

VŠB - TUO, Katedra energetiky; Rekonstrukce kotle K9 za účelem dodržení nových emisních limitů

$$H^r = \frac{M_{H_2}}{M_{sm}} \cdot \left(\omega_{H_2}^r + \omega_{H_2S}^r + \frac{3}{2} \cdot \omega_{NH_3}^r + \sum \frac{n}{2} \cdot \omega_{C_mH_n}^r \right)$$

$$H^r = \frac{2,016}{11,0957} \cdot \left(0,5594 + 0 + \frac{3}{2} \cdot 0 + \sum \frac{6}{2} \cdot 0,0275 \right)$$

$$H^r = 0,2017 - \text{palivo je doplněno o uhlovodíky}$$

$$S^r = \frac{M_S}{M_{sm}} \cdot (\omega_{H_2S}^r + \omega_{SO_2}^r) = 0$$

$$N^r = \frac{M_{N_2}}{M_{sm}} \cdot \left(\omega_{N_2}^r + \frac{1}{2} \cdot \omega_{NH_3}^r \right)$$

$$N^r = \frac{28,016}{11,0957} \cdot (0,0943 + 0)$$

$$N^r = 0,2381$$

$$O^r = \frac{M_{O_2}}{M_{sm}} \cdot \left(\omega_{O_2}^r + \omega_{CO_2}^r + \frac{1}{2} \cdot \omega_{CO}^r + \omega_{SO_2}^r \right)$$

$$O^r = \frac{32}{11,0957} \cdot \left(0,0066 + 0,0219 + \frac{1}{2} \cdot 0,0558 + 0 \right)$$

$$O^r = 0,1626$$

$$W^r = \frac{M_{H_2O}}{M_{sm}} \cdot \omega_{H_2O}^r$$

$$W^r = \frac{18,016}{11,0957} \cdot 0 = 0$$

kontrola:

$$C^r + H^r + S^r + N^r + O^r + W^r$$

$$0,3973 + 0,2017 + 0 + 0,2381 + 0,1626 + 0 = 0,9997 = 1$$

$$V_{VS \min} = \frac{22,39}{0,2095} \left[\frac{C^r}{12,011} + \frac{H^r}{4,032} + \frac{S^r}{32,066} - \frac{O^r}{32,00} \right]$$

$$V_{VS \min} = \frac{22,39}{0,2095} \left[\frac{0,3973}{12,011} + \frac{0,2017}{4,032} + 0 - \frac{0,1626}{32,00} \right]$$

$$V_{VS \min} = 8,3384 \, m_N^3 \cdot kg^{-1}$$

VŠB - TUO, Katedra energetiky; Rekonstrukce kotle K9 za účelem dodržení nových emisních limitů

$$V_{SS \min} = \frac{22,26}{12,011} \cdot C^r + \frac{21,89}{32,066} \cdot S^r + \frac{22,40}{28,016} \cdot N^r + 0,7905 \cdot V_{VS \min}$$

$$V_{SS \min} = \frac{22,26}{12,011} \cdot 0,3973 + \frac{21,89}{32,066} \cdot 0 + \frac{22,40}{28,016} \cdot 0,2381 + 0,7905 \cdot 8,3384$$

$$V_{SS \min} = 7,5181 \text{ m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1}$$

$$V_{S \text{ H}_2\text{O} \min} = 11,1111 \cdot H^r + 1,2433 \cdot W_t^r + (v - 1) \cdot V_{VS \min}$$

$$V_{S \text{ H}_2\text{O} \min} = 11,1111 \cdot 0,2017 + 0 + (1,0060 - 1) \cdot 8,3384$$

$$V_{S \text{ H}_2\text{O} \min} = 2,2911 \text{ m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1}$$

v – poměrná vlhkost je 1,0060, která byla určena při garanční zkoušce

$$V_{SV \min} = V_{SS \min} + V_{S \text{ H}_2\text{O}}$$

$$V_{SV \min} = 7,5181 + 2,2911$$

$$V_{SV \min} = 9,8092 \text{ m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1}$$

Složky stechiometrických objemů pro dokonalé spalování

$$V_{V \text{ CO}_2} = 0,0003 \cdot V_{VS \min} = 0,0003 \cdot 8,3384 = 0,0025 \text{ m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1}$$

$$V_{V \text{ N}_2} = 0,7809 \cdot V_{VS \min} = 0,7809 \cdot 8,3384 = 6,5114 \text{ m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1}$$

$$V_{V \text{ Ar}} = 0,0093 \cdot V_{VS \min} = 0,0093 \cdot 8,3384 = 0,0775 \text{ m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1}$$

$$V_{S \text{ CO}_2} = \frac{22,26}{12,011} \cdot C^r = \frac{22,26}{12,011} \cdot 0,3973 = 0,7363 \text{ m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1}$$

$$V_{S \text{ SO}_2} = \frac{21,89}{32,066} \cdot S^r = \frac{22,26}{12,011} \cdot 0 = 0$$

$$V_{S \text{ N}_2} = \frac{22,40}{28,016} \cdot N^r = \frac{22,26}{12,011} \cdot 0,2017 = 0,1903 \text{ m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1}$$

pro nedokonalé spalování:

$$V_{S \text{ CO}} = \frac{22,41}{12,011} \cdot C^r = \frac{22,41}{12,011} \cdot 0,3973 = 0,7415 \text{ m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1}$$

$$V_{O_2(C)} = \frac{22,39}{12,011} \cdot C^r = \frac{22,26}{12,011} \cdot 0,3973 = 1,0797 \text{ m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1}$$

VŠB - TUO, Katedra energetiky; Rekonstrukce kotle K9 za účelem dodržení nových emisních limitů

$$V_{O_2}(CH_4) = 44,78 \cdot \frac{\omega_{CH_4}^r}{M_{sm}} = 44,78 \cdot \frac{0,2343}{11,0951} = 0,9456 m_N^3 \cdot kg^{-1}$$

$$V_{S CH_4} = 22,4 \cdot \frac{\omega_{CH_4}^r}{M_{sm}} = 22,4 \cdot \frac{0,2343}{11,0951} = 0,4738 m_N^3 \cdot kg^{-1}$$

6.2 Parametry spalin při nedokonalém spalování

6.2.1 Pro uhlí

Podíl uhlíku, který neshoří a odchází ze spalovacího zařízení společně s tuhými zbytky (škvára, popílek, propad, apod.)

-pro popel

$$a_1 = \frac{R7 \cdot \omega_{CO}}{R1 \cdot \omega_{O_2} + R2 \cdot \omega_{CO} + R3}$$

$$a_1 = \frac{6,7006 \cdot 0,00003}{(-6,3172) \cdot 0,052 + 2,4882 \cdot 0,00003 + 1,3241}$$

$$a_1 = 0,00020 kg \cdot kg^{-1}$$

$$b_1 = \frac{A^r}{C^r} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{C_i \cdot X_i}{1 - C_i} = \frac{0,3133}{0,5792} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{0,0965 \cdot 0,8}{1 - 0,0965} = 0,0462 kg \cdot kg^{-1}$$

-pro škváru

$$b_2 = \frac{A^r}{C^r} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{C_i \cdot X_i}{1 - C_i} = \frac{0,3133}{0,5792} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{0,0029 \cdot 0,15}{1 - 0,0029} = 0,0002 kg \cdot kg^{-1}$$

$$b = b_1 + b_2 = 0,0462 + 0,0002 = 0,0464 kg \cdot kg^{-1}$$

U plynných paliv není.

Součinitel přebytku vzduchu

$$\alpha = \frac{R7 \cdot \omega_{O_2} + R5 \cdot \omega_{CO} + R6}{R1 \cdot \omega_{O_2} + R2 \cdot \omega_{CO} + R3}$$

$$\alpha = \frac{(-0,1530) \cdot 0,052 + (-0,5664) \cdot 0,00003 + 1,2699}{(-6,3172) \cdot 0,052 + 2,4882 \cdot 0,00003 + 1,3241}$$

$$\alpha = 1,2674$$

Měrný objem suchých spalín

$$V_{SS} = V_{SS \min} + a_1 \cdot (V_{SCO} + 0,5 \cdot V_{O_2}(C) - V_{SCO_2}) + b \cdot (V_{O_2}(C) - V_{SCO_2}) + (\alpha - 1) \cdot V_{VS \min}$$

$$V_{SS} = 5,7071 + 0,00020 \cdot (1,0806 + 0,5 \cdot 1,0797 - 1,0734) + 0,0464 \cdot (1,0797 - 1,0734) + (1,2674 - 1) \cdot 5,849$$

$$V_{SS} = 7,9647 \text{ m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1}$$

Měrný objem spalín s přepočtem přebytku vzduchu α

$$V_S = V_{SS} + V_{S H_2O}$$

$$V_S = 7,9647 + 0,4155$$

$$V_S = 8,3802 \text{ m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1}$$

$$V_{S H_2O} = V_{S H_2O \min} + (\alpha - 1) \cdot (v - 1) \cdot V_{VS \min}$$

$$V_{S H_2O} = 0,4061 + (1,2674 - 1) \cdot (1,0060 - 1) \cdot 5,849$$

$$V_{S H_2O} = 0,4155 \text{ m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1}$$

Výpočet konstant R1 až R7

$$R_1 = -V_{VS \min} \cdot V_{SCO} = -5,849 \cdot 1,0806 = -6,3172$$

$$R_2 = V_{VS \min} \cdot (0,5 \cdot V_{O_2}(C) - 0,2095 \cdot V_2) = 5,849 \cdot (0,5 \cdot 1,0797 - 0,2095 \cdot 0,5470) = 2,4882$$

$$R_3 = 0,2095 \cdot V_{VS \min} \cdot V_{SCO} = 0,2095 \cdot 5,849 \cdot 1,0806 = 1,3241$$

$$R_4 = V_{SCO} \cdot (V_1 + b \cdot V_3) = 1,0806 \cdot [(-0,1419) + 0,0464 \cdot 0,0063] = -0,1530$$

$$\begin{aligned} R_5 &= V_2 \cdot (b \cdot V_{O_2}(C) - 0,2095 \cdot V_{VS \min}) - 0,5 \cdot V_{O_2}(C) \cdot (V_1 + b \cdot V_3) \\ &= 0,5470 \cdot (0,0464 \cdot 1,0797 - 0,2095 \cdot 5,849) - 0,5 \cdot 1,0797 \cdot [(-0,1419) + 0,0464 \cdot 0,0063] = -0,5664 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} R_6 &= V_{SCO} \cdot (0,2095 \cdot V_{VS \min} - b \cdot V_{O_2}(C)) \\ &= 1,0806 \cdot (0,2095 \cdot 5,849 - 0,0464 \cdot 1,0797) = 1,2699 \end{aligned}$$

VŠB - TUO, Katedra energetiky; Rekonstrukce kotle K9 za účelem dodržení nových emisních limitů

$$R_7 = V_{VS\ min} \cdot [0,2095 \cdot (V_1 + b \cdot V_3) + 0,2095 \cdot V_{VS\ min} - b \cdot V_{O_2}(C)]$$

$$= 5,849$$

$$\cdot [0,2095 \cdot (-0,1419) + 0,0464 \cdot 0,0063 + (0,2095 \cdot 5,849 - 0,0464 \cdot 1,0797)] = 6,7006$$

$$V_1 = V_{SS\ min} - V_{VS\ min} = 5,7071 - 5,849 = -0,1419 \text{ m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1}$$

$$V_2 = V_{SCO} + 0,5 \cdot V_{O_2}(C) - V_{SCO_2} = 1,0806 + 0,5 \cdot 1,0797 - 1,0734$$

$$= 0,5470 \text{ m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1}$$

$$V_3 = V_{O_2}(C) - V_{SCO_2} = 1,0797 - 1,0734 = 0,0063 \text{ m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1}$$

6.2.2 Pro směs plynu

Součinitel přebytku vzduchu

$$\alpha = \frac{R5 \cdot \omega_{O_2} + R6 \cdot \omega_{CO} + R7 \cdot \omega_{CH_4} + R8}{R1 \cdot \omega_{O_2} + R2 \cdot \omega_{CO} + R3 \cdot \omega_{CH_4} + R4}$$

$$\alpha = \frac{0,2882 \cdot 0,052 + 0,1669 \cdot 0,00003 + 1,2602 \cdot 0 + (-0,6137)}{2,9294 \cdot 0,052 + (-1,1524) \cdot 0,00003 + (-4,0117) \cdot 0 + (-0,6137)}$$

$$\alpha = 1,2975$$

Podíl uhlíku, který neshoří a odchází ze spalovacího zařízení společně s tuhými zbytky

-pro popel

$$a_1 = \frac{R9 \cdot \omega_{CO}}{R1 \cdot \omega_{O_2} + R2 \cdot \omega_{CO} + R3 \cdot \omega_{CH_4} + R4}$$

$$a_1 = \frac{(-6,2225) \cdot 0,00003}{2,9294 \cdot 0,052 + (-1,1524) \cdot 0,00003 + (-4,0117) \cdot 0 + (-0,6137)}$$

$$a_1 = 0,000404 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$$

$$a_2 = \frac{R10 \cdot \omega_{CH_4}}{R1 \cdot \omega_{O_2} + R2 \cdot \omega_{CO} + R3 \cdot \omega_{CH_4} + R4}$$

$$a_2 = \frac{-9,7383 \cdot 0}{2,9294 \cdot 0,052 + -1,1524 \cdot 0,00003 + -4,0117 \cdot 0 + -0,6137} = 0$$

Výpočet konstant R1 až R10

$$R_1 = V_{VS\ min} \cdot V_{S\ CO} \cdot V_{S\ CH_4} = 8,3384 \cdot 0,7415 \cdot 0,4738 = 2,9294$$

$$\begin{aligned} R_2 &= V_{VS\ min} \cdot (0,2095 \cdot V_2 - 0,5 \cdot V_{O_2}(C)) \cdot V_{S\ CH_4} \\ &= 8,3384 \cdot (0,2095 \cdot 0,3756 - 0,5 \cdot 0,7408) \cdot 0,4738 = -1,1524 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} R_3 &= V_{S\ CO} \cdot V_{VS\ min} \cdot (0,2095 \cdot V_4 - V_{O_2}(CH_4)) \\ &= 0,7415 \cdot 8,3384 \cdot (0,2095 \cdot 1,1419 - 0,9456) = -4,0117 \end{aligned}$$

$$R_4 = -0,2095 \cdot V_{S\ CO} \cdot V_{S\ CH_4} \cdot V_{VS\ min} = -0,2095 \cdot 0,7415 \cdot 0,4738 \cdot 8,3384 = -0,6137$$

$$R_5 = -V_1 \cdot V_{S\ CO} \cdot V_{S\ CH_4} = -(0,8203) \cdot 0,7415 \cdot 0,4738 = 0,2882$$

$$\begin{aligned} R_6 &= V_{S\ CH_4} \cdot [0,5 \cdot V_1 \cdot V_{O_2}(C) + 0,2095 \cdot V_2 \cdot V_{VS\ min}] \\ &= 0,4738 [0,5 \cdot (-0,8203) \cdot 0,7408 + 0,2095 \cdot 0,3756 \cdot 8,3384] \\ &= 0,1669 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} R_7 &= V_{S\ CO} \cdot [V_1 \cdot V_{O_2}(CH_4) + 0,2095 \cdot V_4 \cdot V_{VS\ min}] \\ &= 0,7415 \cdot [(-0,8203) \cdot 0,9456 + 0,2095 \cdot 1,4169 \cdot 8,3384] = 1,2602 \end{aligned}$$

$$R_8 = -0,2095 \cdot V_{VS\ min} \cdot V_{S\ CO} \cdot V_{S\ CH_4} = -0,2095 \cdot 8,3384 \cdot 0,7415 \cdot 0,4738 = -0,6137$$

$$\begin{aligned} R_9 &= -0,2095 \cdot V_{VS\ min} \cdot V_{S\ CH_4} \cdot [V_1 + V_{VS\ min}] \\ &= -0,2095 \cdot 8,3384 \cdot 0,4738 \cdot [(-0,8203) + 8,3384] = -6,2225 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} R_{10} &= -0,2095 \cdot V_{VS\ min} \cdot V_{S\ CO} \cdot [V_1 + V_{VS\ min}] \\ &= -0,2095 \cdot 8,3384 \cdot 0,7415 \cdot [(-0,8203) + 8,3384] = -9,7383 \end{aligned}$$

$$V_1 = V_{SS\ min} - V_{VS\ min} = 7,5181 - 8,3384 = -0,8203 \text{ m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1}$$

$$\begin{aligned} V_2 &= V_{S\ CO} + 0,5 \cdot V_{O_2}(C) - V_{S\ CO_2} = 0,7415 + 0,5 \cdot 0,7408 - 0,7363 \\ &= 0,3756 \text{ m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1} \end{aligned}$$

$$V_3 = V_{O_2}(C) - V_{S\ CO_2} = 0,7408 - 0,7363 = 0,0045 \text{ m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1}$$

$$V_4 = V_{S\ CO} - V_{V\ CO_2} + V_{O_2}(CH_4) = 0,4738 - 0,0025 + 0,9456 = 1,4169 \text{ m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1}$$

Měrný objem suchých spalín

$$V_{SS} = V_{SS\ min} + (\alpha - 1) \cdot V_{VS\ min}$$

$$V_{SS} = 7,5181 + (1,2975 - 1) \cdot 8,3384$$

$$V_{SS} = 9,7478 \text{ m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1}$$

VŠB - TUO, Katedra energetiky; Rekonstrukce kotle K9 za účelem dodržení nových emisních limitů

$$V_S = V_{SS} + V_{S_{H_2O \min}} + \alpha \cdot (v - 1) \cdot V_{VS \min} = 9,7478 + 2,2911 + 1,2975 \cdot (1,0060 - 1) \cdot 8,3384 = 12,1023 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$$

6.2.3 Vypočtené hodnoty

Stechiometrické objemy vzduchu a spalín (při dokonalém spalování):			
Název	Jednotka	pro uhlí	pro směs plynu
$V_{VS \min}$	$\text{m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1}$	5,849	8,3384
$V_{SS \min}$	$\text{m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1}$	5,7071	7,5181
$V_{S_{H_2O \min}}$	$\text{m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1}$	0,4061	2,2911
$V_{S \min}$	$\text{m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1}$	6,1132	9,8092
Jednotlivé složky stochiometrických objemů jsou:			
$V_{V_{CO_2}}$	$\text{m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1}$	0,0018	0,0025
$V_{V_{N_2}}$	$\text{m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1}$	4,5674	6,5114
$V_{V_{Ar}}$	$\text{m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1}$	0,0543	0,0775
$V_{S_{CO_2}}$	$\text{m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1}$	1,0734	0,7363
$V_{S_{SO_2}}$	$\text{m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1}$	0,0024	0
$V_{S_{N_2}}$	$\text{m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1}$	0,0076	0,1903
dále pro nedokonalé spalování:			
$V_{S_{CO}}$	$\text{m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1}$	1,0806	0,7415
$V_{O_2(C)}$	$\text{m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1}$	1,0797	0,7408

Tabulka č.13 Molární hmotnost plynů

6.3 Střední měrná tepelná kapacita spalín

$$c_s(t) = \frac{(A \cdot t + B + \frac{C}{t})}{V_S}$$

$$A = A_0 + \alpha \cdot A_\alpha$$

$$B = B_0 + \alpha \cdot B_\alpha$$

$$C = C_0 + \alpha \cdot C_\alpha$$

-pro uhlí

VŠB - TUO, Katedra energetiky; Rekonstrukce kotle K9 za účelem dodržení nových emisních limitů

$$A_0 = [(1 - a_1 - a_2 - b) \cdot V_{S\ CO_2} + V_{V\ CO_2}] \cdot A1 + V_{S\ SO_2} \cdot A2 + (V_{S\ N_2} + V_{V\ N_2}) \cdot A3 \\ + V_{V\ Ar} \cdot A4 + V_{S\ H_2O\ min} \cdot A5 + A^r \cdot (1 - X_{sk}) \cdot A7 - V_{VS\ min} \\ \cdot (A6 + (v - 1) \cdot A5) + (0,5 \cdot a_1 + b) \cdot V_{O_2}(C) \cdot A8 + a_1 \cdot V_{S\ CO} \cdot A9 + a_2 \\ \cdot (V_{O_2}(CH_4) \cdot A8 + V_{S\ CH_4} \cdot A10)$$

$$A_0 = [(1 - 0,00020 - 0 - 0,0464) \cdot 1,0806 + 0,0018] \cdot 4,164716E - 04 + 0,0024 \\ \cdot 2,578208E - 04 + (0,0076 + 4,5674) \cdot 1,324242E - 04 + 0,0543 \\ \cdot -1,547000E - 03 + 0,4061 \cdot 2,939415E - 04 + 0,3133 \cdot (1 - 0) \cdot 0 \\ - 5,849 \cdot (1,538565E - 04 + (1,0060 - 1) \cdot 2,939415E - 04) \\ + (0,5 \cdot 0,00020 + 0,0464) \cdot 1,0797 \cdot 1,745297E - 04 + 0,00020 \\ \cdot 1,0806 \cdot 1,707545E - 04 + 0 \cdot (0 \cdot 1,745297E - 04 + 0 \cdot 1,712890E \\ - 03)$$

$$A_0 = 0,000173134$$

$$B_0 = [(1 - a_1 - a_2 - b) \cdot V_{S\ CO_2} + V_{V\ CO_2}] \cdot B1 + V_{S\ SO_2} \cdot B2 + (V_{S\ N_2} + V_{V\ N_2}) \cdot B3 \\ + V_{V\ Ar} \cdot B4 + V_{S\ H_2O\ min} \cdot B5 + A^r \cdot (1 - X_{sk}) \cdot B7 - V_{VS\ min} \\ \cdot (B6 + (v - 1) \cdot B5) + (0,5 \cdot a_1 + b) \cdot V_{O_2}(C) \cdot B8 + a_1 \cdot V_{S\ CO} \cdot B9 \\ + a_2(V_{O_2}(CH_4) \cdot B8 + V_{S\ CH_4} \cdot B10)$$

$$B_0 = [(1 - 0,00020 - 0 - 0,0464) \cdot 1,0806 + 0,0018] \cdot 1,789756 + 0,0024 \\ \cdot 2,028744 + (0,0076 + 4,5674) \cdot 1,219579 + 0,0543 \cdot 0,92792 \\ + 0,4061 \cdot 1,325136 + 0,3133 \cdot (1 - 0) \cdot 0 - 5,849 \\ \cdot (1,208695 + (1,0060 - 1) \cdot 1,325136) + (0,5 \cdot 0,00020 + 0,0464) \\ \cdot 1,0797 \cdot 1,267865 + 0,00020 \cdot 1,0806 \cdot 1,2992527 + 0 \cdot (0 \cdot 1,267865 \\ + 0 \cdot 1,526394)$$

$$B_0 = 0,9831992$$

$$C_0 = [(1 - a_1 - a_2 - b) \cdot V_{S\ CO_2} + V_{V\ CO_2}] \cdot C1 + V_{S\ SO_2} \cdot C2 + (V_{S\ N_2} + V_{V\ N_2}) \cdot C3 \\ + V_{V\ Ar} \cdot C4 + V_{S\ H_2O\ min} \cdot C5 + A^r \cdot (1 - X_{sk}) \cdot C7 - V_{VS\ min} \\ \cdot (C6 + (v - 1) \cdot C5) + (0,5 \cdot a_1 + b) \cdot V_{O_2}(C) \cdot C8 + a_1 \cdot V_{S\ CO} \cdot C9 \\ + a_2(V_{O_2}(CH_4) \cdot C8 + V_{S\ CH_4} \cdot C10)$$

VŠB - TUO, Katedra energetiky; Rekonstrukce kotle K9 za účelem dodržení nových emisních limitů

$$C_0 = [(1 - 0,00020 - 0 - 0,0464) \cdot 1,0806 + 0,0018] \cdot (-77,301592) + 0,0024 \cdot (-87,341506) + (0,0076 + 4,5674) \cdot 12,39297 + 0,0543 \cdot 0,940106 + 0,4061 \cdot 23,236609 + 0,3133 \cdot (1 - 0) \cdot 0 - 5,849 \cdot (12,885736 + (1,0060 - 1) \cdot 23,236609) + (0,5 \cdot 0,00020 + 0,0464) \cdot 1,0797 \cdot (-2,515435) + 0,00020 \cdot 1,0806 \cdot 17,506083 + 0 \cdot (0 \cdot (-2,515435) + 0 \cdot (-123,755162))$$

$$C_0 = -90,00124274$$

-pro směs plynu

$$A_0 = 0,002259$$

$$B_0 = 0,891521$$

$$C_0 = -129,005$$

-pro uhlí

-tyto hodnoty byli převzaty z garančních výpočtů

$$A_\alpha = 0,0009102$$

$$B_\alpha = 7,11684662$$

$$C_\alpha = 76,1897951$$

-pro směs plynu

-tyto hodnoty byli převzaty z garančních výpočtů

$$A_\alpha = 0,001298$$

$$B_\alpha = 10,14473$$

$$C_\alpha = 108,6049$$

-pro uhlí

$$A = A_0 + \alpha \cdot A_\alpha = 0,000171134 + 1,2674 \cdot 0,0009102 = 0,0013268$$

$$B = B_0 + \alpha \cdot B_\alpha = 0,983199242 + 1,2674 \cdot 7,11684662 = 10,00310$$

$$C = C_0 + \alpha \cdot C_\alpha = -90,00124274 + 1,2674 \cdot 76,1897951 = 6,56170$$

-pro směs plynu

$$A = A_0 + \alpha \cdot A_\alpha = 0,002259 + 1,2975 \cdot 0,001298 = 0,00380$$

$$B = B_0 + \alpha \cdot B_\alpha = 0,901521 + 1,2975 \cdot 10,14473 = 14,05430$$

$$C = C_0 + \alpha \cdot C_\alpha = -129,005 + 1,2975 \cdot 108,6049 = 11,90985$$

-pro uhlí

$$c_s(t) = \frac{(0,0013268 \cdot 400,913 + 10,00310 + \frac{6,56170}{400,913})}{8,3802} = 1,2591 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

-pro směs plynu

$$c_s(t) = \frac{(0,00380 \cdot 400,913 + 14,05430 + \frac{11,90985}{400,913})}{12,1023} = 1,2896 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$$

t – teplota pro stanovení c_s ; 400,913K

V_s – skutečný objem spalín

Výsledná střední měrná kapacita spalín

$$c_s(t) = 1,26154 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$$

I	Složka	A(I)	B(I)	C(I)
1	CO ₂	4,164716E-04	1,789756	-77,301592
2	SO ₂	2,578208E-04	2,028744	-87,341506
3	N ₂	1,324242E-04	1,219579	12,39297
4	Ar	-1,547000E-03	0,92792	0,940106
5	H ₂ O	2,939415E-04	1,325136	23,236609
6	Vzduch suchý	1,538565E-04	1,208695	12,885736
7	Popel	-	-	-
8	O ₂	1,745297E-04	1,267865	-2,515435
9	CO	1,707545E-04	1,190457	17,506083
10	CH ₄	1,712890E-03	1,526394	-123,755162

Tabulka č.14 Tabulka hodnot koeficientů

7 Určení teploty rosného bodu

Jestliže je vodní pára ve spalínách nižší nebo rovná rosnému bodu na poslední teplosměnné ploše - v našem případě je to ohřívák vzduchu, dochází ke kondenzaci vodní páry a následné nízkoteplotní korozi na výhřevných plochách. Teplota rosného bodu je závislá především na druhu spalovaného paliva, kde se zjišťuje obsah vody W , vodíku H a síry S , dále je to na typu ohniště, přebytku vzduchu n a v neposlední řadě koncentrace popílku.

$$t_r = t_k + \Delta t_r$$

$$\Delta t_r = \frac{\beta \cdot \sqrt[3]{S_r}}{1,05^{4,19 \cdot X_u \cdot A_r}}$$

$$t_r = 55 + \frac{190 \cdot \sqrt[3]{0,0161}}{1,05^{4,19 \cdot 0,95 \cdot 1,2128}}$$

$$t_r = 91,09^\circ\text{C}$$

kde:

$t_k - 55^\circ\text{C}$, teplota kondenzace vodní páry ve spalínách

$\beta - 190$, koeficient při přebytku vzduchu 1,2674

$$S_r = \frac{S}{Q_i^r} = \frac{0,36}{25,831} = 0,0139 \text{ \%kg/MJ}$$

Q_i^r – vyhřevnost v [MJ/kg]

S - obsah síry v [%]

$X_u = 0,95$, poměrný obsah popela v úletu pro prášková ohniště

$$A_r = \frac{A^r}{Q_i^r} = \frac{31,33}{25,831} = 1,2128 \text{ \%kJ/MJ}$$

A_r - redukovaný obsah popela v [%] v původním stavu

A^r - obsah popela v [%] v původním palivu

8 Tepelné ztráty kotle a výpočet nepřímé účinnosti

Pára		
Teplota	°C	524,98
Tlak	MPa	9,70
Množství	t·h ⁻¹	197,92
Napájecí voda		
Teplota vody	°C	155,47
Tlak vody	MPa	13,70
Jmenovitý výkon	MW	154,8
Provozní výkon	MW	152,72
Další údaje		
Jmenovitý výkon kotle	MW	154,80
Srovnávací teplota vzduchu	°C	20,00
Naměřená teplota vzduchu	°C	13,70
Spaliny		
Teplota	°C	127,80
O ₂	%	5,2
CO	ppm	30
SO ₂	ppm	326
Tuhé zbytky		
Nedopal popelu	%	0,29
Nedopal popílku	%	9,65
Zachycení popela	%	15,0
Zachycení popílku	%	80,0
Teplota popela	°C	600,0

Tabulka č.15 Vstupní údaje kotle K9

$$\eta = 1 - \xi_{CO} - \xi_C - \xi_k - \xi_f - \xi_{sv}$$

kde ξ_i jsou poměrné tepelné ztráty kotle:

$i = CO$ – hořlavinou ve spalínách;

C – hořlavinou v tuhých zbytcích;

k – fyzickým teplem spalín (komínová);

sv – sdílením tepla do okolí;

Ztrátou hořlavinou ve spalínách:

$$\xi_{CO} = \frac{(12640 \cdot a_1 \cdot V_{S\ CO} + 35800 \cdot a_2 \cdot V_{S\ CH_4})}{Q_i}$$

$$\xi_{CO} = \frac{(12640 \cdot 0,00020 \cdot 1,0806 + 35800 \cdot 0 \cdot 0)}{25831}$$

$$\xi_{CO} = 0,0001057 \rightarrow \mathbf{0,0105\ \%}$$

Ztrátou hořlavinou v tuhých zbytcích:

$$\xi_C = \frac{b \cdot C^r \cdot 32600}{Q_i}$$

$$\xi_C = \frac{0,0464 \cdot 0,5792 \cdot 32600}{25831}$$

$$\xi_C = 0,0339 \rightarrow \mathbf{3,390\ \%}$$

Ztrátou fyzickým teplem spalín (komínová):

$$\xi_k = \frac{V_S \cdot c_s \cdot (t_k - t_o)}{Q_i}$$

$$\xi_k = \frac{8,798 \cdot 1,26154 \cdot (127,763 - 14)}{25831}$$

$$\xi_k = 0,0488 \rightarrow \mathbf{4,888\ \%}$$

Ztrátou fyzickým teplem tuhých zbytků:

$$\xi_t = A^r \cdot \left(\sum \frac{X_i \cdot c_{s_i} \cdot (t_i - t_o)}{1 - C_i} \right) / Q_i$$

$$\xi_t = 0,3133 \cdot \left(\sum \frac{0,15 \cdot 1,0132 \cdot (127,763 - 14)}{1 - 0,0029} \right) / 25831$$

$$\xi_t = 0,00210 \rightarrow \mathbf{0,210\%}$$

-střední měrná tepelná kapacita tuhých zbytků

$$c_{s_i} = 0,712 + 0,502 \cdot 10^{-3} \cdot t_i = 0,712 + 0,502 \cdot 10^{-3} \cdot t_i = 1,013 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

kde: t_i – teplota škváry; 600°C

Ztrátou sdílením tepla do okolí v závislosti na výkonu kotle

-pro uhlí

$$\xi_{sv} = \xi_{svj} \cdot \frac{Q_{výrj}}{Q_{výr}}$$

$$\xi_{sv} = 0,00428 \cdot \frac{154,8}{152,72}$$

$$\xi_{sv} = 0,00434 \rightarrow \mathbf{0,434\%}$$

kde:

$$\xi_{svj} = k_i \cdot Q_{výrj}^{-0,35} \cdot 10^{-2}$$

$$\xi_{svj} = 2,5 \cdot 154,8^{-0,35} \cdot 10^{-2}$$

$$\xi_{svj} = 0,00428$$

kde:

k_i – konstanta; 2,5 pro černé uhlí a 1,5 pro plyn

-pro směs plynu

$$\xi_{sv} = \xi_{svj} \cdot \frac{Q_{výrj}}{Q_{výr}}$$

VŠB - TUO, Katedra energetiky; Rekonstrukce kotle K9 za účelem dodržení nových emisních limitů

$$\xi_{sv} = 0,00268 \cdot \frac{154,8}{152,72}$$

$$\xi_{sv} = 0,00271 \rightarrow \mathbf{0,271\%}$$

kde:

$$\xi_{svj} = k_i \cdot Q_{výrj}^{-0,35} \cdot 10^{-2}$$

$$\xi_{svj} = 1,5 \cdot 154,8^{-0,35} \cdot 10^{-2}$$

$$\xi_{svj} = 0,00271$$

8.1 Shrnutí jednotlivých ztrát a určení účinnosti

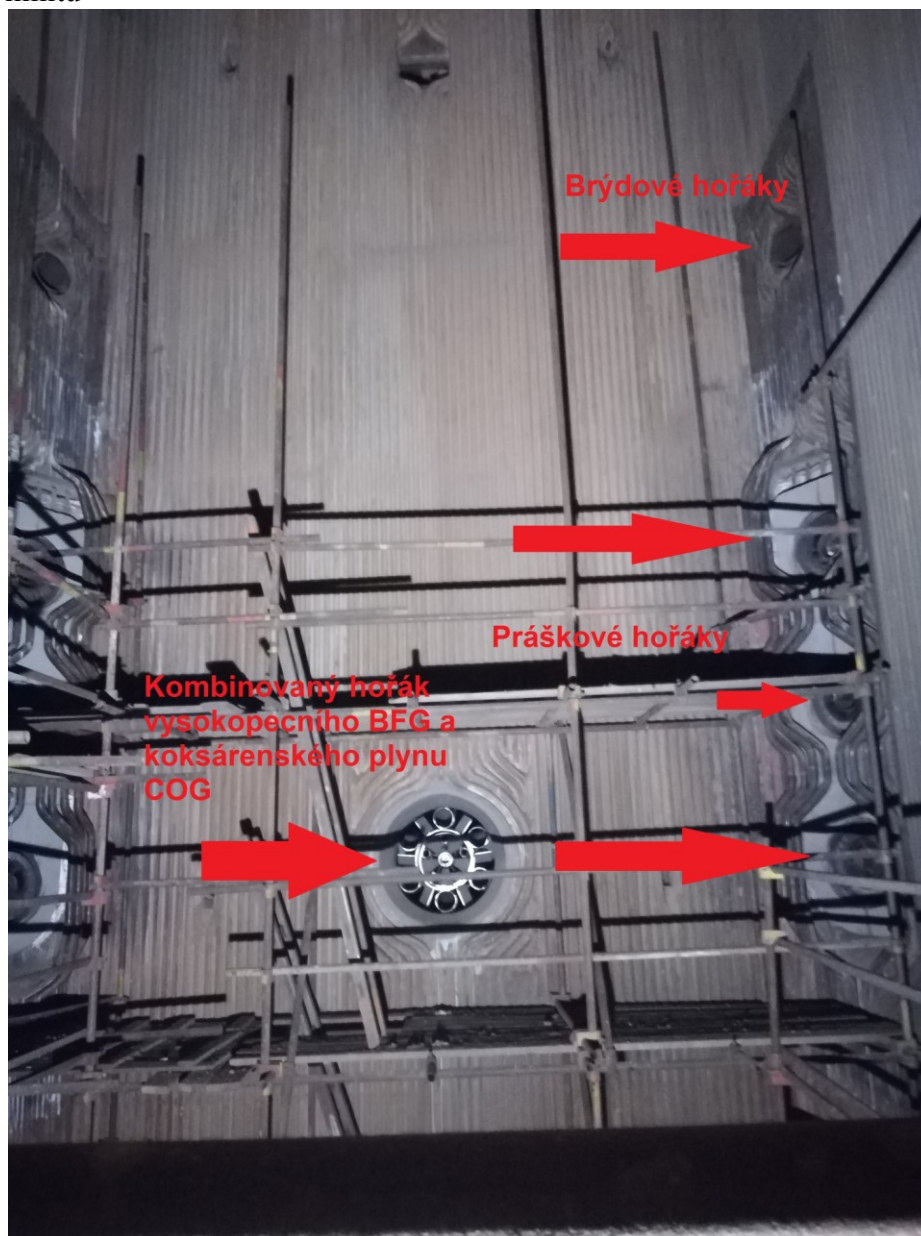
Ztráta hořlavinou ve spalínách ξ_{co}	%	0,0105
Ztráta hořlavinou v tuh. zbytcích ξ_c	%	3,390
Ztráta fyzickým teplem spalin ξ_k	%	4,888
Ztráta fyzickým teplem tuh. zbytků ξ_t	%	0,210
Ztráta sdílením tepla do okolí ξ_{sv}	%	0,702
Součet ztrát	%	9,2005
Účinnost kotle	%	90,7995

Tabulka č.16 Tabulka jednotlivých ztrát kotle

9 Hlavní části kotle a jeho další technická zařízení

9.1 Topeniště, spalovací komora

Spalovací komora je obdélníkového tvaru má rozměry 9087,2 x 5887,2 mm a je tvořena membránovými stěnami a jsou řazeny jako výparník. Stěny jsou plynotěsné a vyztužené bandážemi. Ohniště má v každém rohu umístěny 3 práškové hořáky a 2 hořáky na koksárenský plyn pro stabilizaci (slouží také jako zapalovací). Vrchní a spodní práškové hořáky jsou se stabilizací a střední práškový hořák je bez stabilizace KP. 2 ks Brýdové hořáky jsou umístěny v zadní stěně spalovací komory. Práškové hořáky jsou umístěny od spodní hrany ve výšce +8,692 m; +9,870 m; +11,048 m.



Obrázek č.16 Rozmístění hořáku ve SK Zdroj: [Dominik Matouš]

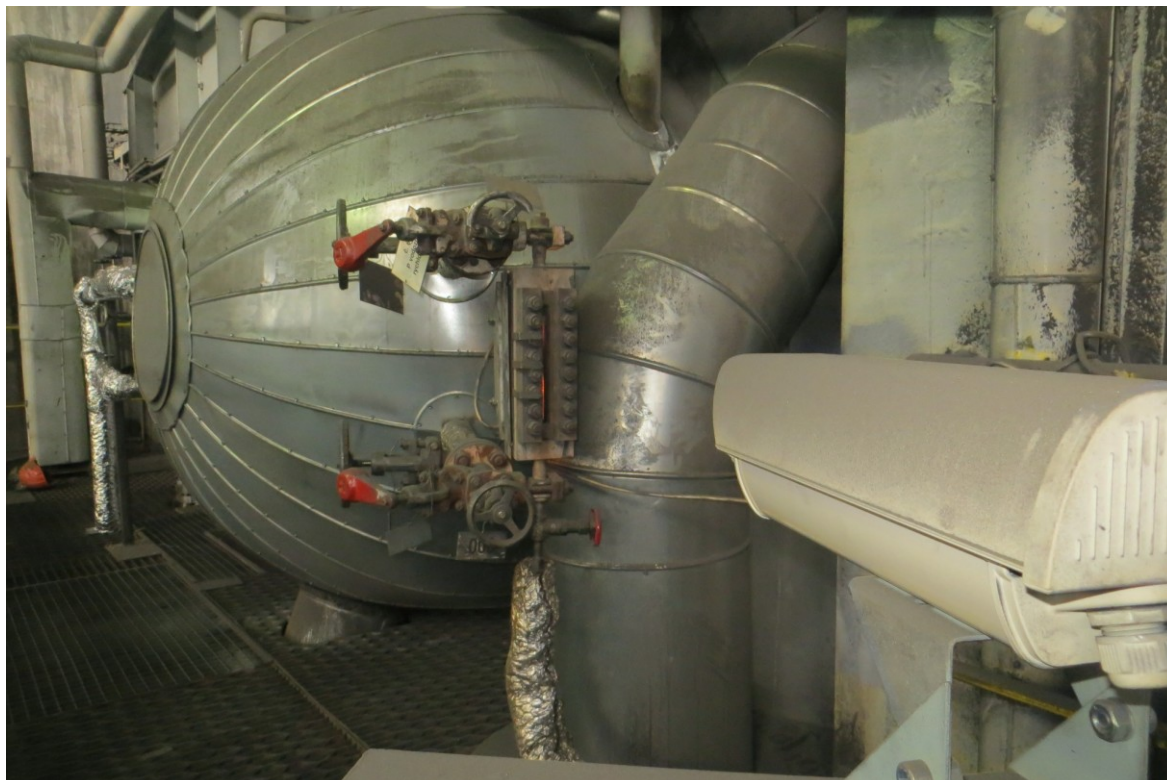
9.2 Buben, vestavba, závěsy

Buben o objemu vody $12,4 \text{ m}^3$ s půlkulovými dny je po obou stranách opatřen průřezy. Samotné těleso je umístěno na výškové úrovni +32,0 m, na válcové části jsou přivařeny nátrubky pro připojení parních a vodních spojek, spádového potrubí, odvodnění, odluhu, odvzdušnění a potrubí pro připojení k pojišťovacím ventilům. Vnitřní zařízení bubnu je tvořeno soustavou cyklónů po celé délce bubnu u bočních stěn, napájecích žlabů a odlučovacích plechů (separátorů) pro odloučení vody z páry při vstupu do parních spojek a dál do přehříváku.

Buben je zavěšen pomocí dvou třmenů na ocelové konstrukci stropu kotle. Spádové potrubí tvoří 22 ks trubek (DN 159 x 10) vyvedených z bubnu a zaústěných do spodních

VŠB - TUO, Katedra energetiky; Rekonstrukce kotle K9 za účelem dodržení nových emisních limitů

komor výparníku, ve výsypce kotle, na výškové úrovni +3,1 m a +4,2 m.



Obrázek č.17 Snímání hladiny napájecí vody v bubnu Zdroj: [Dominik Matouš]

9.3 Výparník kotle

Výparník kotle je tvořen membránovými stěnami ohniště, mříží a dnem mezitahu. Stěny ohniště jsou plynotěsné a provedeny z membránových stěn, které jsou následovně vyztuženy bandážemi. Ve vrchní části kotle je výparník ukončen horními komorami, které mají za úkol pomocí spojek vést parovodní směs do bubnu. Za výparníkem je tzv. obrátová komora, která je umístěna v oblasti druhého kotle a ve kterém dochází ke změně proudění spalin.

Mříž, která je pokračováním zadní stěny výparníku je tvořena 57ks trubek Ø 60,3x5mm. Rozteč je 160mm. Výparník dále pokračuje dnem mezitahu a další mříží. Dno je tvořeno 56ks trubek Ø 60,3x5 mm. Rozteč mezi nimi je 160mm. Následující mříž uzavírá část výparníku. Je tvořena 56ks trubek Ø 60,3x5 mm ve dvou řadách. Rozteč mezi nimi je 320mm.

Stěny SK jsou vyztuženy systémem teplých bandáží, které jsou v rozích spojeny pomocí čepů a jsou upevněny na membránovou stěnu.

VŠB - TUO, Katedra energetiky; Rekonstrukce kotle K9 za účelem dodržení nových emisních limitů

Směs vody a páry, která vystupuje z výparníku je zavedena do horních komor výparníku. Odtud je následovně vedena vodními parovodními spojkami do bubnu. Parovodní spojky jsou tvořeny 120ks o \varnothing 76 x 5 mm. Parní spojky a slouží k převodu vyrobené a odloučené páry z bubnu k přehříváku.

9.4 Přehřívák kotle, vstřikovací regulace teploty přehřáté páry

Přehřívák P1(konvekční) tvoří stropní úsek v celém rozsahu od přední stěny SK po zadní stěnu 2. tahu.

Přehřívák P2 (šotový přehřívák) je umístěn v horní části SK u přední stěny.

Přehřívák P3 (šotový přehřívák) je umístěn v horní části SK u zadní stěny.

Přehřívák P4 (konvekční) je umístěn v mezitahu kotle v pořadí jako druhý. Je protiproudý. Dochází v něm k regulaci teploty páry pomocí vstřiku napájecí vody.

Přehřívák P5 (konvekční) je umístěn jako první přehřívák v mezitahu. Je zapojen souproutně .

Regulace teploty páry probíhá v přehříváku P4. Je dvoustupňová a jako vstřikovací médium slouží napájecí voda, která je přiváděna pomocí potrubí k regulačním armaturám. Vstřikovací ventily jsou poháněny pomocí elektropohonu. Jsou nicméně vybaveny ručním uzavíráním v případě nutnosti. Za regulačními armaturami je umístěno měřicí zařízení sloužící pro měření teploty páry po vstřiku.

9.5 Ohřívák vody (EKO 1, EKO 2)

Pro dosažení co největší účinnosti kotle jsou umístěny ohříváky vody ve druhém tahu kotle ve čtyřech paralelních spalinových kanálech nad ohřívákem vzduchu. Z důvodu jednoduchosti čištění či údržbě jsou provedeny jako pětisvazkové. Regulace teploty u EKA musí být zajištěna z toho důvodu, že se nachází v oblastech vysokých teplot a její chlazení je zajištěno nucenou cirkulací vzduchu, který je odebírán před vstupem do EKA a následně využíván k sekundárnímu vzduchu.

9.6 Ohřívák vzduchu (LUVO 1, LUVO 2)

Jedná se o dvoustupňový ohřívák vzduchu, kde mezi těmito výměníky je umístěno EKO1. Horký vzduch je mezi ohříváky dopravován prostřednictvím kanálu. Spodní ohřívák - LUVO 1 - je dvoudílný, horní ohřívák - LUVO 2 - je jednodílný.

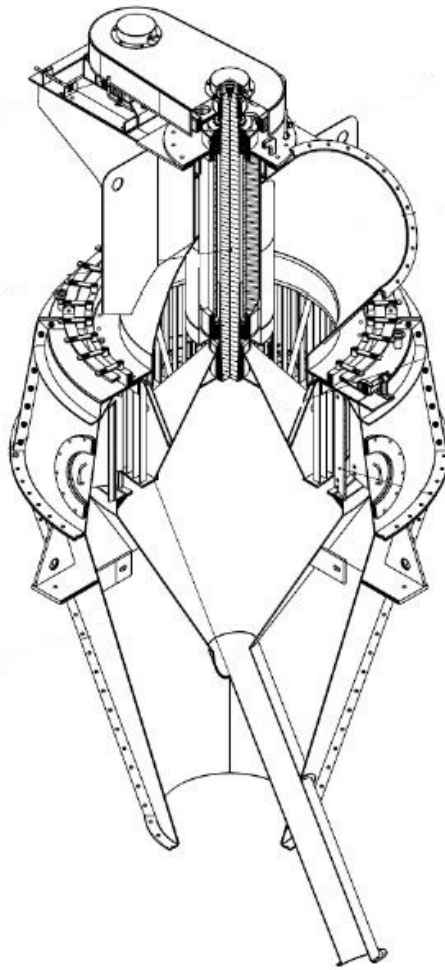
Vstupní teplota	LUVO 1	31°C	Entalpie vzduchu [kJ/kg]
			404,930
	LUVO 2	35°C	Entalpie vzduchu [kJ/kg]
			456,400
Výstupní teplota	LUVO 1	333°C	Entalpie vzduchu [kJ/kg]
			4165,280
	LUVO 2	337°C	Entalpie vzduchu [kJ/kg]
			4213,920

Tabulka č.17 Teploty a entalpie předehřívání vzduchu na vstupu a výstupu

9.7 Mlecí zařízení

Mlecí zařízení patří mezi základní primární opatření při snižování emisí. Na kotli K9 byl proto nainstalován nový dynamický třídič místo předchozího stacionárního.

Proces namletí uhlí je takový, že surové uhlí je uloženo v zásobnících, odkud se dopravují k talířovým podavačům a následně volným pádem do mlýna. Mlýn je trubnatý s výkonem 30 tun uhlí/hod. V něm dochází jako k mletí tak zároveň k sušení. Sušení je zajištěno recirkulací spalin ze tří míst ve druhém tahu kotle (tedy horkými a zároveň studenými spaliny). Za mlýnem je namleté palivo dopravováno do třídiče, kde dochází k odloučení dostatečně nenamletého uhlí s práškem. Nenamleté uhlí se vrací klapkami zpět před mlýn. Proces pokračuje do té doby, než dostatečně namleté uhlí projde regulačními klapkami v třídiči. Jemnost prášku je nastavována v třídiči pomocí regulačních klapek, otáčky lopatkového koše rotoru a množství dopravovaného média. Chlazení třídiče je zajištěno pomocí atmosférického vzduchu, který je přiveden před mlýn. Z třídiče je pneumaticky prášek unášen k cyklónům v němž dochází k odloučení prášku a dopravovaného média (tedy vzduchu). Prášek je přes podavače zaveden do zásobníku, kde následně je dopravován k jednotlivým práškovodům. Zásobník paliva je chlazen pomocí dusíku společně s atmosférickým vzduchem.



Obrázek č.18 Průřez dynamického třídiče Zdroj: [Jan Matoušek]



Obrázek č.19 Detail uhlí před vstupem do mlýnu Zdroj: [Dominik Matouš]

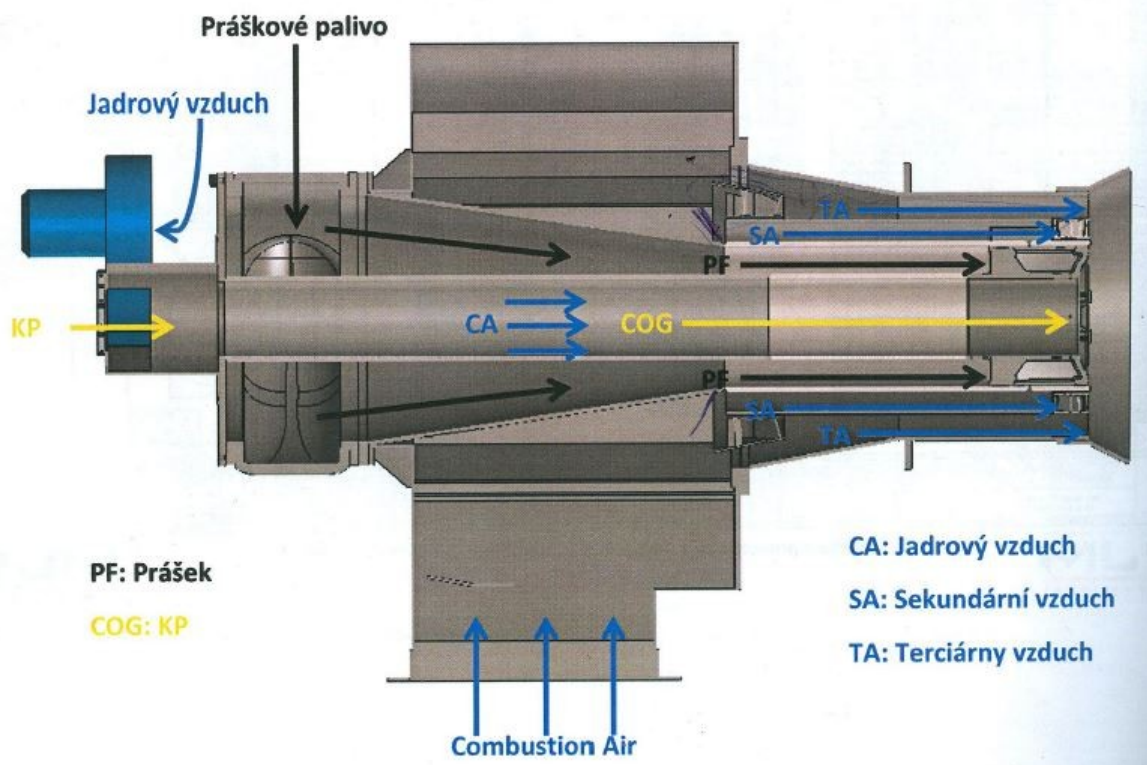
Základní mlecí zařízení se skládá z:

- *talířového podavače*
- *trubnatého mlýnu*
- *třidiče*
- *dvou cyklónů*
- *mlýnského ventilátoru*
- *regulačních a uzavíracích klapek*
- *zásobníku prášku*
- *dvou brýdových hořáků*
- *potrubí mlýnského okruhu*

9.8 Hořáky

Kotel K9 je vybaven 12 kusy práškovými hořáky Ultra Low NO_x, ve kterých vzniká velice malé množství NO_x. Hořáky jsou dimenzovány a nastaveny tak, aby dosahovaly 100% zatížení při spalování pouze černého namletého uhlí. Celkový průtok práškového paliva je 7kg/s a byl určen na základě parního výkonu 200t/h. Všechny horní a spodní práškové hořáky (tedy 8 hořáků) obsahují zabudovaný takzvaný pilotní hořák, který zajišťuje ohřev kotle, zapálení plamene, možnost spalování koksárenského plynu.

Pro zajištění dodatečného množství vzduchu jsou k dispozici také 16 otvorů pro OFA. Ty mají za úkol snížení nedopalu v popelu a emise CO. Podmínkou největší účinnosti je dostatečná rychlost proudění vzduchu do SK aby pronikl spaliny a aby nespálené částice plně oxidovaly. Schéma nízkoemisního hořáku je na následujícím obrázku.



Obrázek č.20 Nízkoemisní hořák Zdroj: [2]

Hořáky kotle K9		
Popis jednotlivých hořáků	jednotky	Kotel K9
Práškové hořáky		
počet	ks	12
jmenovitý výkon jednotlivého práškového hořáku	ks	14,70
celkový výkon práškových hořáků	MW	176,40
počet práškových hořáků s integrovanými COG hořáky	ks	8
výkon integrovaného COG hořáku	MW	2,00
celkový výkon integrovaných COG hořáků	MW	16,00
Kombinované plynové hořáky		
počet	ks	2
výkon BFG části jednoho hořáku	MW	15,00
celkový výkon BFG hořáků	MW	30,00
počet integrovaných COG hořáků	ks	2
výkon jednoho integrovaného COG hořáku	MW	8,70
celkový výkon integrovaných COG hořáků	MW	17,40
Brýdové hořáky		

VŠB - TUO, Katedra energetiky; Rekonstrukce kotle K9 za účelem dodržení nových emisních limitů

počet brýdových hořáků	ks	4
množství brýd / hořák	$\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$	3,18
množství brýd / kotel	$\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$	12,7

Tabulka č.18 Shrnutí hořáků na kotli K9



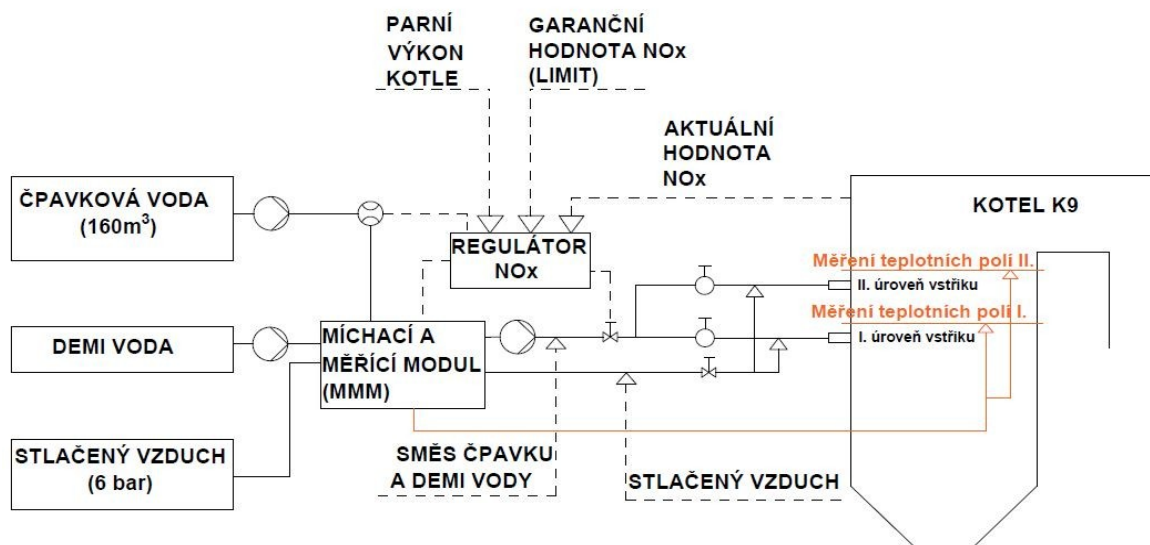
Obrázek č.21 Detail uhelného prášku, který je připraven pro spalování Zdroj: [Dominik Matouš]

10 Aplikace metody SNCR na kotli K9

Za účelem dosažení co nejmenší limitů NO_x , je potřeba vybavit kotel také metodou SNCR, která je detailněji popsána v kapitole [4]. Jako vstřikovací reagent byl zvolen 25% čpavková voda, které se mísí v míchacím modulu s demineralizovanou vodou, dále jen Demi vodou v potřebném poměru. Nad vstřikem by mělo docházet k měření teploty spalin. Podle tohoto měření, řídicí systém bude zajišťovat jednotlivé vstřikování reagentu do SK aby nedocházelo k výraznému čpavkovému skluzu. Vstřik do SK je zajištěn také pomocí přivedeného stlačeného vzduchu, která má za úkol dokonalé rozstříknutí čpavku.

Vstřik bude probíhat ve dvou úrovních a to ve výšce +21,5m a +26m. Na každé úrovni je nainstalováno 14 kopí (celkem 28), které vstřikují směs dle potřeby. Rozmístění vstřikovacích kopí ve SK je v **Příloze č.1 a 2**.

V nádrži se čpavkem jsou nainstalována dvě ponorná čerpadla. Jedno funguje jako záložní z důvodu výpadku provozu primárního. Ty dopravují čpavek do míchacího a měřicího modulu, dále jen MMM. V MMM, který je umístěn ve výšce +21m, dochází k jednotlivým měřením průtoků, tedy stlačeného vzduchu, demi vody a reagentu. Média jsou nadále dopravována k jednotlivým vstřikovacím kopím pomocí nerezových trubek, která jsou považována za bezpečné. Jednoduché a okamžité nasazení jednotlivých nerezových trubek ke směšovací komoře u vstřikovacího kopí je zajištěno tlakovými rychlospojky. Vypracovaný model zapojení a schéma metody SNCR jsou na následujících obrázcích.



Obrázek č.22 Schéma SNCR Zdroj: [vlastní schéma]



Obrázek č.23 Míchací a měřicí modul Zdroj: [Dominik Matouš]

SNCR technologie se skládá z armatur, potrubních tras, čerpadel, škrtících ventilů, kohoutů, manometrů a měřicího zařízení k měření průtoků médií, aktuálního parního výkonu kotle a požadovaných hodnot NO_x a aktuální hodnotou NO_x .

10.1 Návrh vstřikovacího kopí

Vstřikovací kopí je konstruováno jako dvousložkové a má za úkol dokonalé promíšení reagentu s přivedeným stlačeným vzduchem. Technologické schéma vstřikovacího kopí je uvedeno v **Příloze č.3**. Důvod přivedení stlačeného vzduchu je proto, aby došlo k nejlepšímu rozprášení kapiček reagentu do SK. Kopí se skládá z ochranné trubky, upínací příruby, směšovací komory a hrotu trysky.

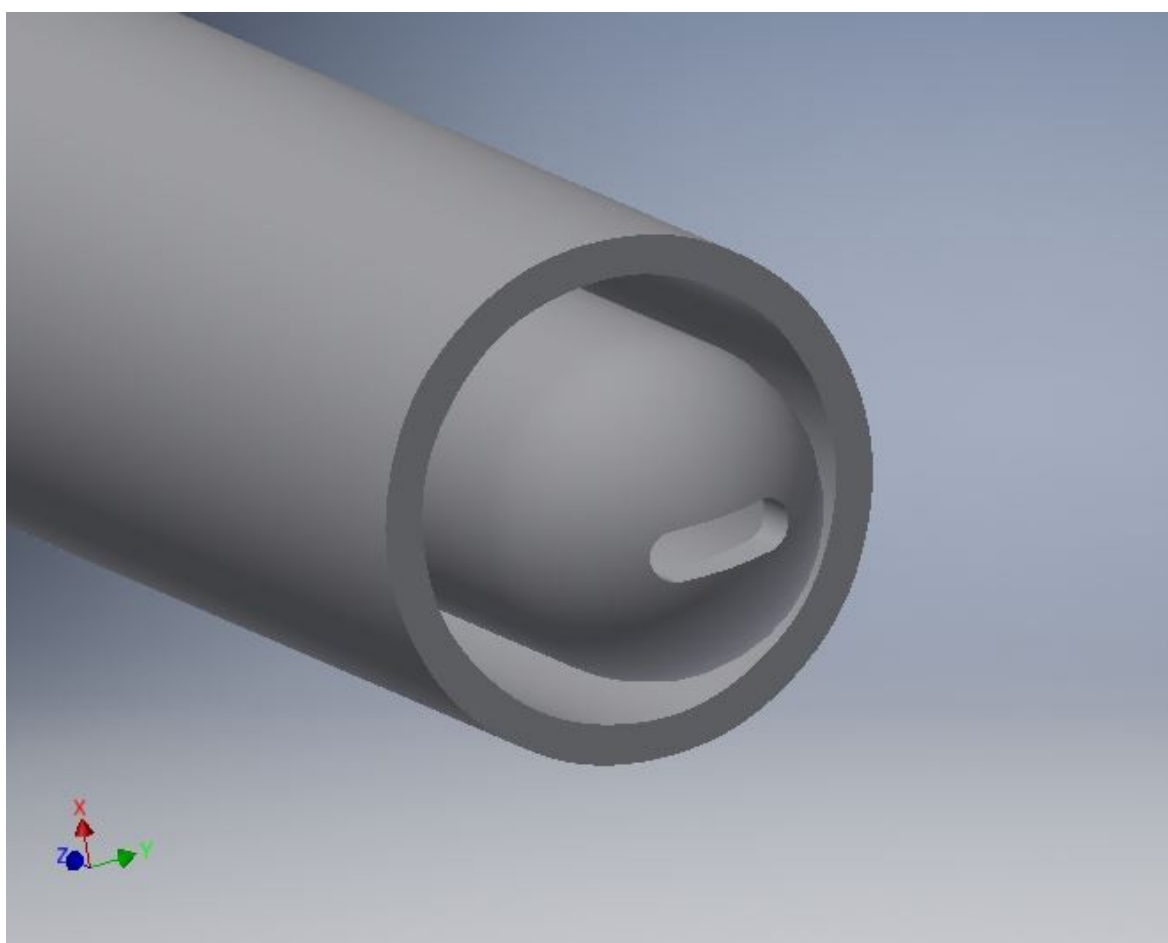
Ochranná trubka, která má za úkol ochránit vstřikovací kopí z důvodu vysokých teplot a dalších mechanických vnějších vlivů je tvořena trubicí o průměru 76,3x3,3 s přírubou, která je přichycena na skříň výhybu pomocí čtyř šroubů. Příruba slouží k zasunutí vstřikovacího kopí, jeho bezpečnostní uchycení pomocí pojistek. Příruba také zajišťuje potřebnou hloubku vsunutí. Ukázka přichycení vstřikovací kopí k přírubě je na **obrázku č.26**.

VŠB - TUO, Katedra energetiky; Rekonstrukce kotle K9 za účelem dodržení nových emisních limitů

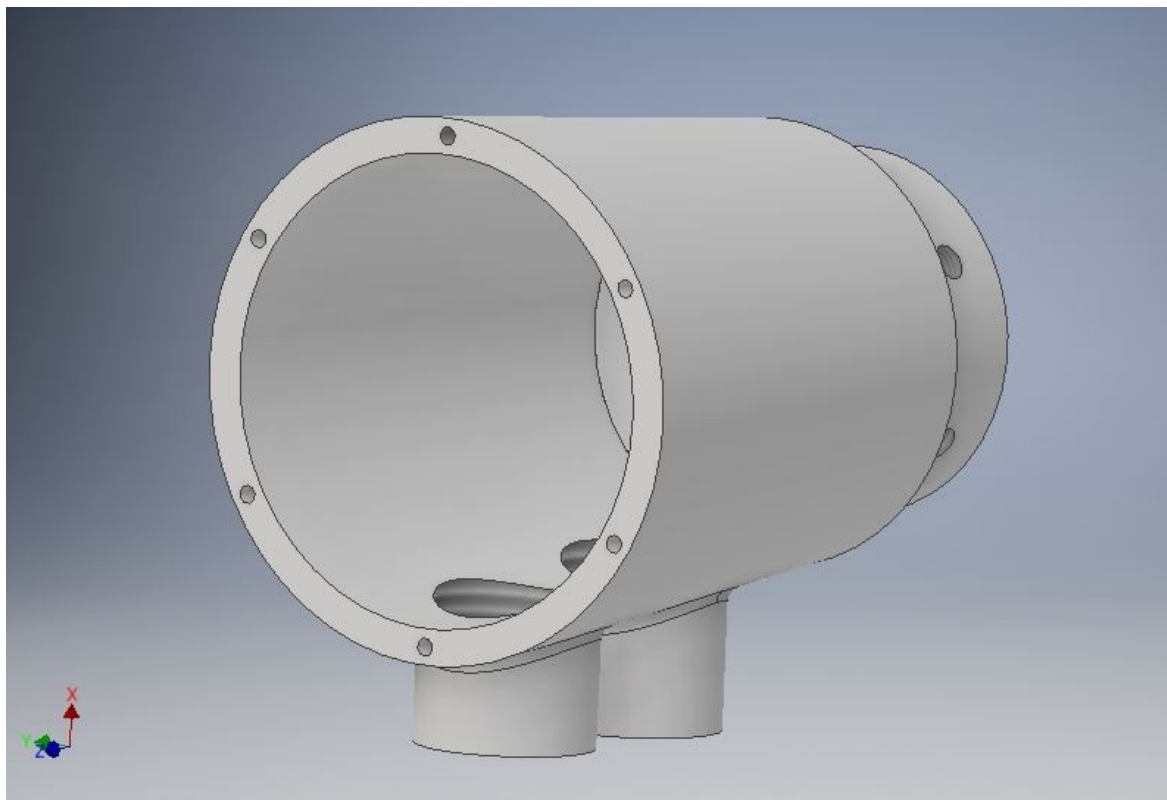
Směšovací komora má za úkol dokonalé promíšení směsi (čpavkové vody s demi vodou) a tlakového vzduchu. Toto médium je nadále dopravováno ke hrotu trysky a následnému rozprášení do SK. Detail hrotu trysky je zobrazen na **obrázku č.25**.

Hrot trysky je uchycen ke vnitřní trubce, která vede ke směšovací komoře. Společně s vnitřní trubkou je vedena také vnější trubka, která má za úkol vytvořit mezikruží aby docházelo k chlazení vnitřní trubky a tedy směsi. Hrot trysky byl navrhnout s plošným rozstříkem. Plošný rozstřík byl použit proto, že SK je větších rozměrů a musí pokrýt velkou plochu rozstříku. Detail hrotu trysky je zobrazen na následujícím **obrázku č.24**.

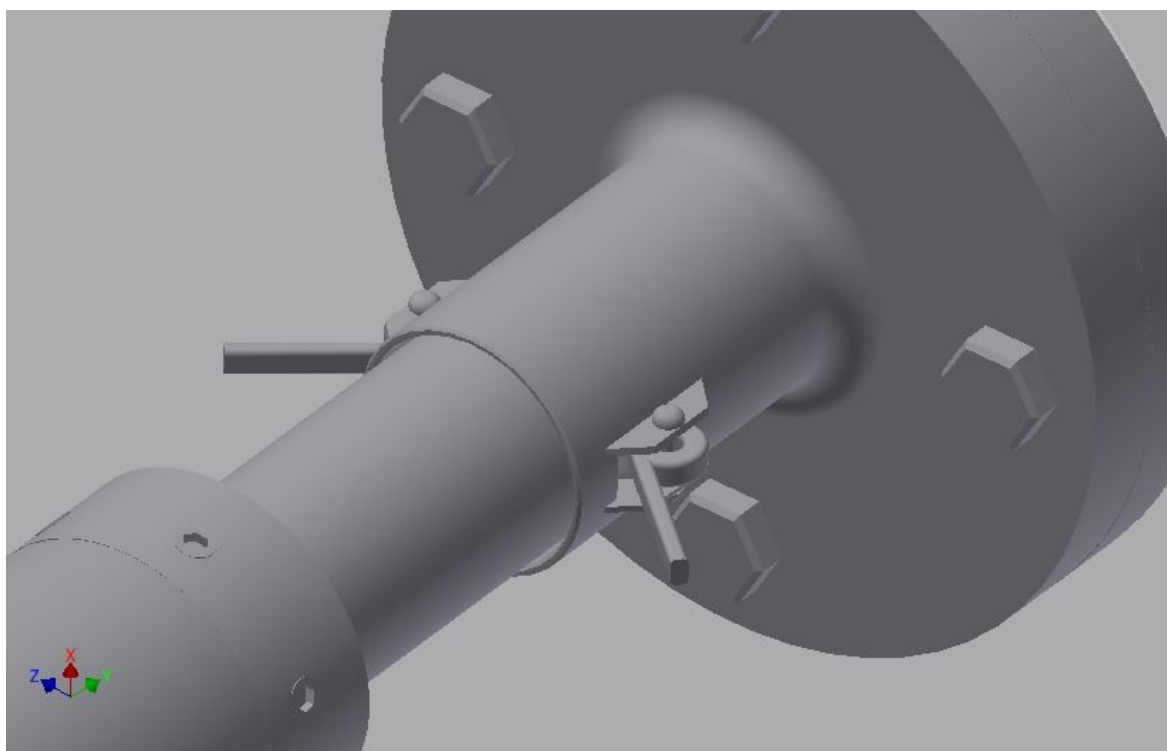
Jednotlivé součásti byly vymodelovány ve Autodesk Inventor 2017 a CAD 2017.



Obrázek č.24 Detail hrotu trysky vstříkovacího kopí v ochranné trubce Zdroj: [vlastní model]



Obrázek č.25 Detail směšovací komory Zdroj: [vlastní model]



Obrázek č.26 Detail zabezpečení vstřikovacího kopí k přírubě Zdroj: [vlastní model]



Obrázek č.27 Pohled na vstřikovací kopí ve SK Zdroj: [Dominik Matouš]

10.2 Návrh nosného a rozprašovacího média

U návrhu byla zvolena *čpavková voda*, kde její vlastnosti jsou vypsány v následující tabulce. Důvod proč je čpavek jen v koncentraci z 25% je z bezpečnostního důvodu.. Kdyby došlo k náhlému nárůstu tlaku či teploty, nedojde k výbuchu zařízení. Skladování reagentu musí být opatřeno bezpečnostním záchytným místem z důvodu havárie a následně možnému úniku do životního prostředí, kanalizace či půdy. Důvod proč byl zvolen čpavek je z toho důvodu, že teplotní okno (850 - 1050°C) se nachází v blízkosti stěn SK a vstřikovacích kopí a tím pádem jeho vlastnosti nepoškodí teplosměnné plochy. V opačném případě by byla možnost použít např. močovinu.

Během manipulace a ovládání je nutnost dodržovat veškeré bezpečnostní předpisy, tedy práce v ochranných brýlích, rukavicích, apod.

Chemická charakteristika	čpavková voda 25 % (hm.)
Hustota	910 kg/m ³
Barva	bez barvy až nažloutlá (někdy slabě zakalená)
Zápach	silně čpavý, štiplavý, dráždivý
pH	> 13

Třída nebezpečnosti kapaliny	třída 2A
Teplota varu	38°C
Hořlavost	nehořlavý
Tlak	6 bar

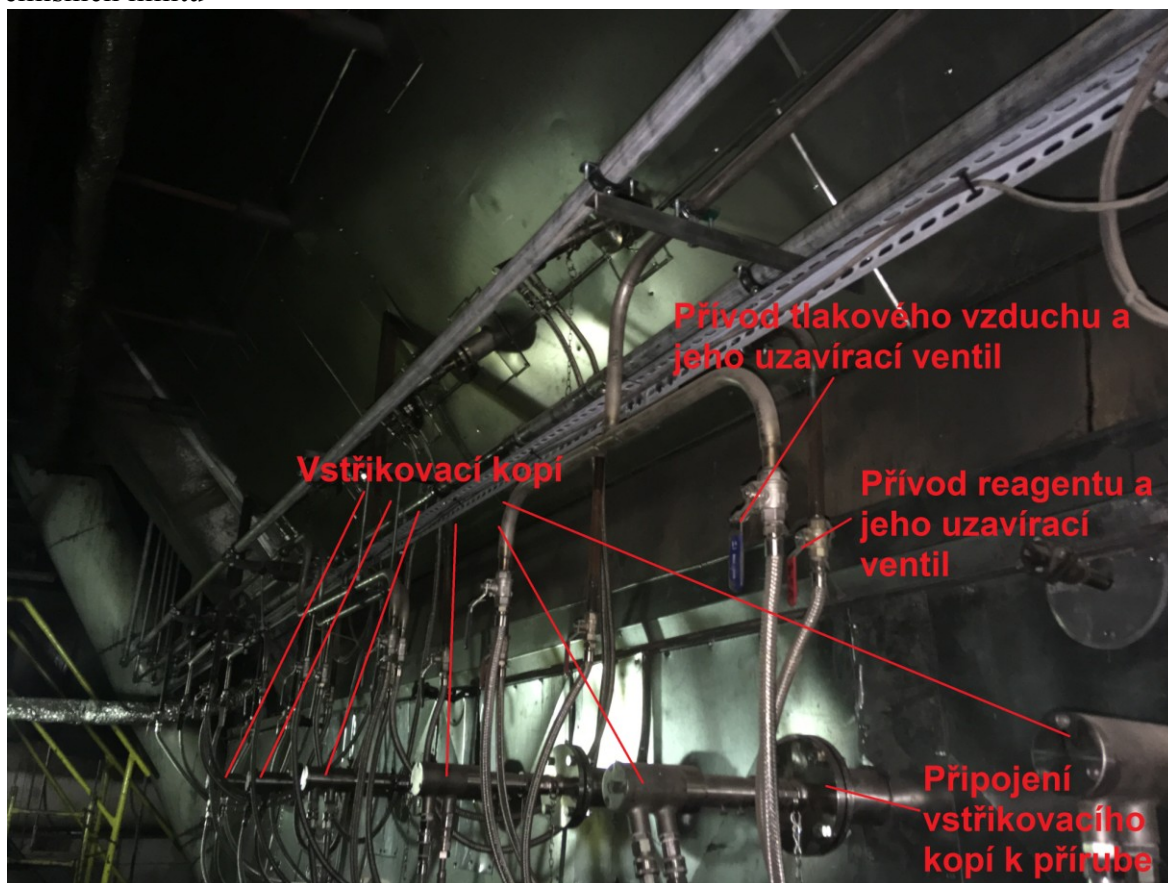
Tabulka č.19 Vlastnosti reagentu



Obrázek č.28 Nádrže čpavkové vody a její opatření bezpečnostní jímkou Zdroj: [Dominik Matouš]

Tlakový vzduch se používá pro rozprášení reagentu a pro ovládání pneumatických armatur použitých v zařízení SNCR. Dále je tlakový vzduch také využit pro chlazení trysek, které nejsou v činnosti. Pro ovládání armatur je použit suchý vzduch zbavený olejových příměsí. Přípojný bod stlačeného vzduchu je na vstupu do Míchacího a měřicího modulu. Tlakový vzduch je také použit pro ovládání ventilů na plnicím potrubí zásobní nádrže. Teplota vzduchu je v rozmezí 10-40 °C.

Ředící voda (Demivoda) je voda, která je zbavená minerálů aby nedocházel k zanášení modulu a používá se jako redukční činidlo u reagentu. Poté musí dojít k účinné distribuci rozprášeného reagentu v průřezu spalovací komory při jakékoli vstupní koncentraci NO_x. Teplota média je 20-30°C.



Obrázek č.29 Zapojení vstříkovacího kopí Zdroj: [Dominik Matouš]

10.3 Výpočet množství potřebného reagentu

Název	Značka	Jednotky	Hodnota
Hmotnost čpavkové vody	M_{NH_4OH}	$g \cdot mol^{-1}$	35,04
Hmotnost 2 NO	$M_{2,NO}$	$g \cdot mol^{-1}$	30,01
Koncentrace roztoku čpavkové vody	c	%	25
Stechiometrický přebytek reagentu	β	-	2,8
Hustota čpavkové vody	$\rho_{\text{čpavkové vody}}$	$kg \cdot m^{-3}$	910

Tabulka č.20 Hmotnosti jednotlivých složek

Teoretické

$$\Delta NO_X = NO_X^1 - NO_X^2 [mg \cdot m^{-3}]$$

$$\Delta NO_X = 340 - (< 200)$$

$$\Delta NO_X = 140 mg \cdot m^{-3}$$

kde:

$$NO_X^1 - \text{obsah } NO_X \text{ ve spalínách po instalaci primárního opatření } [mg \cdot m^{-3}]$$

$$NO_X^2 - \text{garanční obsah } NO_X \text{ ve spalínách } [mg \cdot m^{-3}]$$

$$NO_{X,SK}^1 = NO_X^1 \cdot \frac{21 - O_{2,REFERENČNÍ}}{21 - O_{2,NAMĚŘENÉ}}$$

$$NO_{X,SK}^1 = 340 \cdot \frac{21 - 5,76}{21 - 5,2}$$

$$NO_{X,SK}^1 = 328 mg \cdot m^{-3}$$

kde,

$$O_{2,SKUTEČNÉ} - \text{naměřený obsah kyslíku ve spalínách } [\%]$$

$$O_{2,TEORETICKÉ} - \text{referenční obsah kyslíku ve spalínách } [\%]$$

$$NO_{X,SK}^2 = NO_X^2 \cdot \frac{21 - O_{2,REFERENČNÍ}}{21 - O_{2,NAMĚŘENÉ}}$$

$$NO_{X,SK}^2 = 200 \cdot \frac{21 - 5,76}{21 - 5,2}$$

$$NO_{X,SK}^2 = 193 mg \cdot m^{-3}$$

Skutečné

$$\Delta NO_{X,SKUTEČNÉ} = NO_{X,SK}^1 - NO_{X,SK}^2$$

$$\Delta NO_{X,SKUTEČNÉ} = 328 - 193$$

$$\Delta NO_{X,SKUTEČNÉ} = 135 mg \cdot m^{-3}$$

kde:

VŠB - TUO, Katedra energetiky; Rekonstrukce kotle K9 za účelem dodržení nových emisních limitů

$NO_{X,SK}^1$ – skutečný obsah NO_X ve spalínách s uvažováním skutečného

referenčního kyslíku [$mg \cdot m^{-3}$]

$NO_{X,SK}^2$ – garanční obsah NO_X ve spalínách s uvažováním skutečného

referenčního kyslíku [$mg \cdot m^{-3}$]

Výpočet skutečného množství NO ve spalínách

$$\Delta NO = \Delta NO_{X,SKUTEČNÉ} \cdot \frac{M_{NO}}{M_{NO_2}} = 135 \cdot \frac{30,01}{46,01} = 88,053 \text{ mg} \cdot m^{-3}$$

Teoretický výpočet spotřeby čpavku

$$m_{NH_4OH} = \frac{\Delta NO}{1000000} \cdot \frac{M_{NH_4OH}}{M_{2,NO}} \cdot V_{SS} \text{ [kg} \cdot h^{-1}\text{]}$$

$$m_{NH_4OH} = \frac{88,053}{1000000} \cdot \frac{35,04}{60,01} \cdot 195934$$

$$m_{NH_4OH} = 10,073 \text{ kg} \cdot h^{-1}$$

kde:

ΔNO – skutečné množství NO ve spalínách [mg/m^3]

$M_{2,NO}$ – molární hmotnost NO [$g \cdot mol^{-1}$]

M_{NH_4OH} – molární hmotnost čpavkové vody NH_4OH [$g \cdot mol^{-1}$]

V_{SS} – skutečné množství suchých spalín; 195934 [$m^3 \cdot h^{-1}$]

Skutečný výpočet spotřeby čpavkové vody

$$m_{NH_4OH,SKUTEČNÉ} = m_{NH_4OH} \cdot \beta$$

$$m_{NH_4OH,SKUTEČNÉ} = 10,073 \cdot 2,8$$

$$m_{NH_4OH,SKUTEČNÉ} = 28,207 \text{ kg} \cdot h^{-1}$$

kde:

m_{NH_4OH} – teoretická spotřeba reagentu [$kg \cdot h^{-1}$]

Přepočet čpavku s koncentrací 25% v Demi vodě

$$m_{REAGENT} = \frac{m_{NH_4OH,SKUTEČNÉ}}{\frac{c_{REAGENT}}{100}}$$

$$m_{REAGENT} = \frac{28,207}{\frac{25}{100}}$$

$$m_{REAGENT} = 112,828 kg \cdot h^{-1} \rightarrow \frac{m_{REAGENT}}{\rho_{\text{čpavkové vody}}} \cdot 1000 = \frac{112,828}{910} \cdot 1000 = 123,987 l \cdot h^{-1}$$

kde:

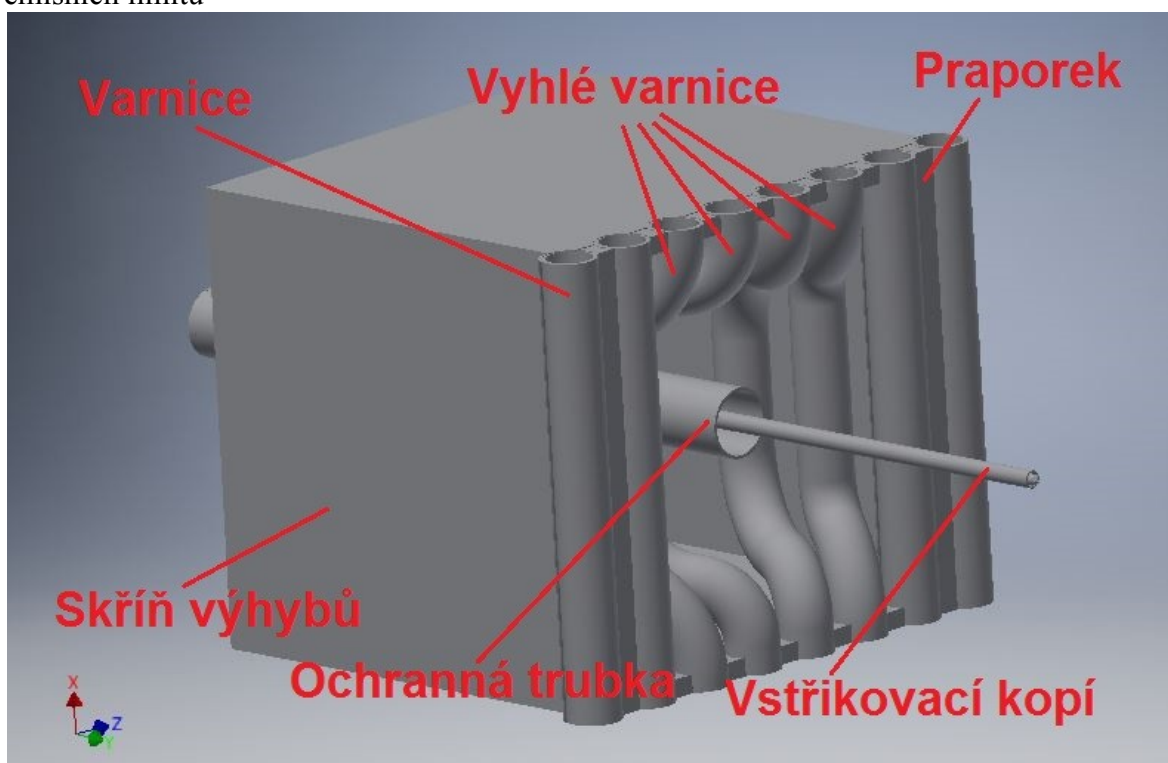
$m_{NH_4OH,SKUTEČNÉ}$ – skutečná spotřeba čpavkové vody [kg/h]

$c_{REAGENT}$ – koncentrace čpavku v reagentu [%]

$\rho_{\text{čpavkové vody}}$ – hustota čpavkové vody v [kg · m⁻³]

10.4 Úprava spalovací komory pro sekundární opatření

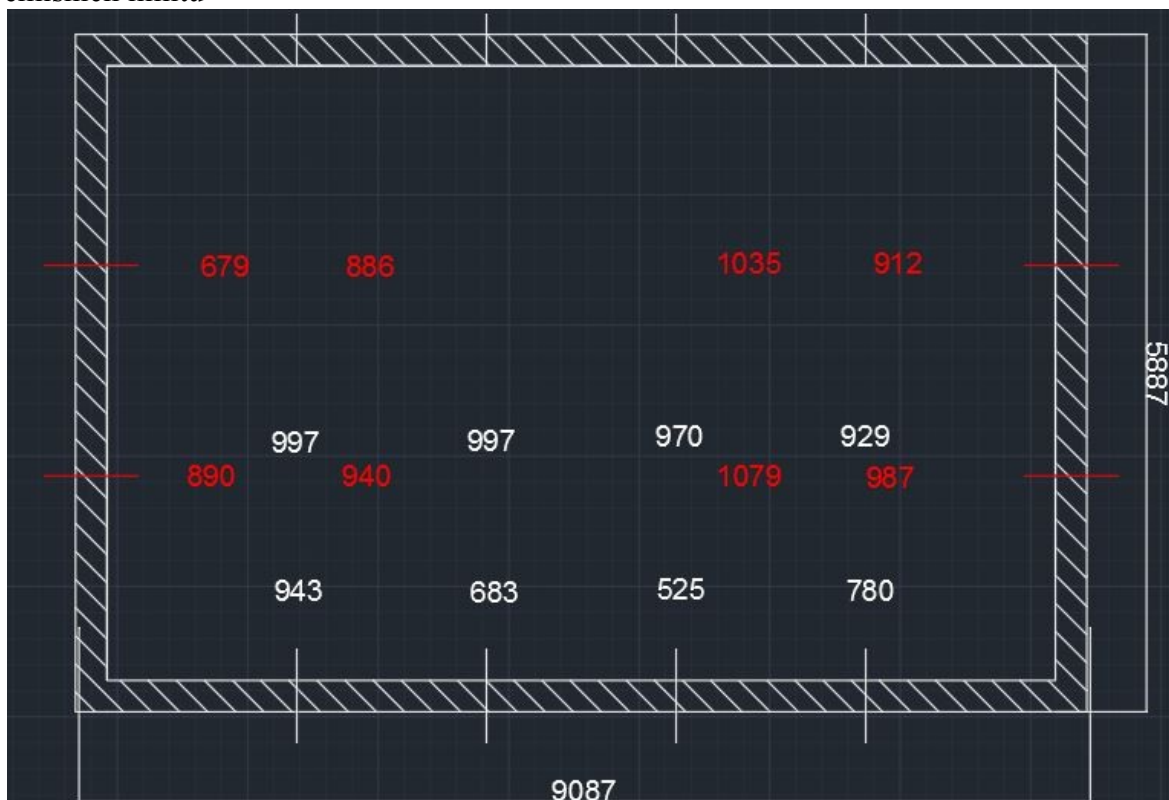
Původní konstrukce kotlu K9 měla nedostačující prostor mezi okraji jednotlivých trubek, proto byla potřeba stěny kotle upravit tak, aby mezi ně bylo možné vsunout vstříkovací kopí. Provedly se tedy takzvané výhyby parních trubek, což spočívá v tom, že čtyři trubky výparníku se vyhnout do boku a vytvoří se tak místo pro vsunutí kopí. Výhyby parních trubek jsou součástí výkresové **Přílohy č.4**. Příklad výhybu je uveden na následujícím obrázku



Obrázek č.30 Celková sestava výhybů ve SK a vsunuté vstříkovací kopí Zdroj: [vlastní model]

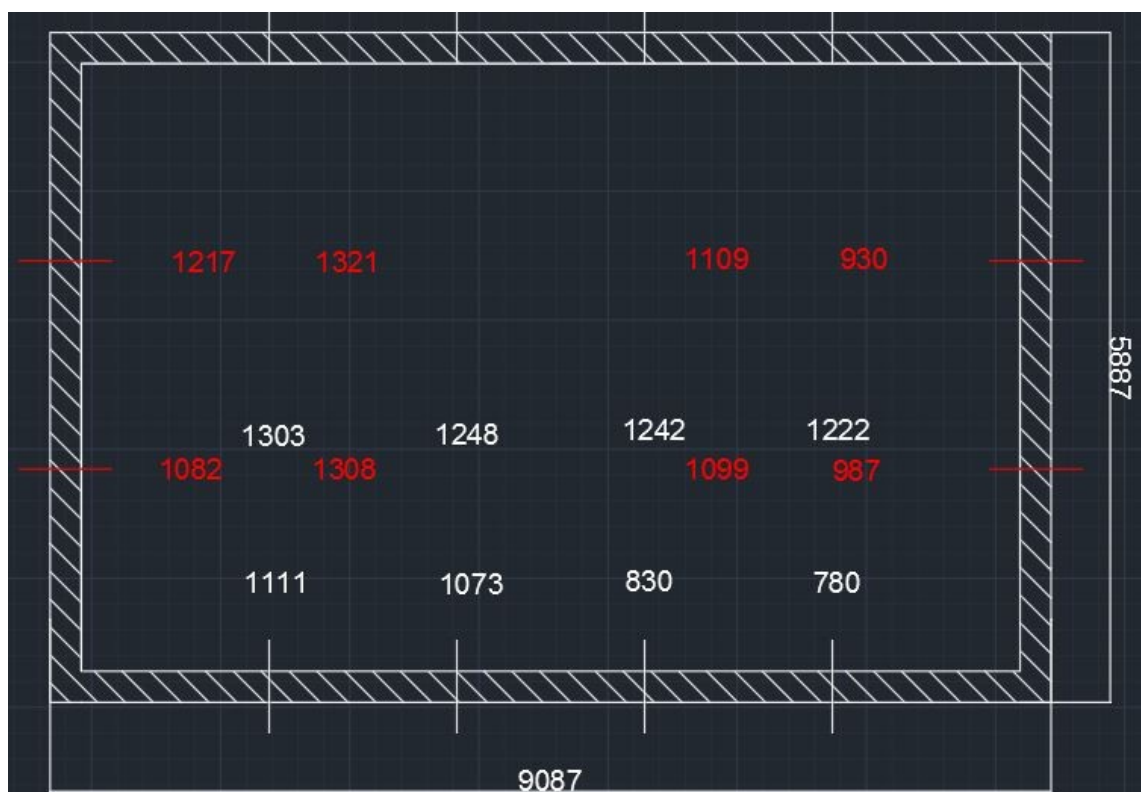
10.5 Návrh rozmístění trysek do spalovací komory

Z posledního měření teploty (16.1.2019), kterého jsem se zúčastnil bylo patrné, že teploty nedosahují požadovaných hodnot na levé straně spalovací komory. Při vstřikování čpavkové vody v těchto místech může mít za následek výrazný čpavkový skluz. Proto navrhuji, aby se vstříkovací kopí posunula k pravé straně SK, dál od šotových přehříváků, aby bylo dosaženo co nejlepší účinnosti snížení NO_x ve spalinách. Popřípadě umístění tří vstříkovacích kopí na pravou stranu a pouze dvě kopí na levou stěnu. Teploty ve SK se měřily pomocí termokamery skrz otvory pro vstříkovací kopí. Rozmístění vstříkovacích kopí ve SK je v **Příloze č.1 a 2**



Obrázek č.31 Naměřené teploty [°C] ve SK ve výšce 21,5m Zdroj: [vlastní schéma]

Poznámka: Měření teplot probíhalo z čelní strany SK!



Obrázek č.32 Naměřené teploty [°C] ve SK ve výšce 26m Zdroj: [vlastní schéma]

Poznámka: Měření teplot probíhalo ze zadní strany SK!



Obrázek č.33 Termokamera pro měření teploty ve SK Zdroj: [Dominik Matouš]

10.6 Vliv technologie SNCR z hlediska účinnosti kotle

Jestliže je na kotli nainstalována technologie SNCR, je potřeba je vzít v potaz to, že je do kotle přiváděno nové médium (směs reagentu a tlakového vzduchu), které mají v porovnání s kotlem velmi nízké parametry, tedy nízkou entalpii. To má za následek odpaření směsi a ohřátí vzduchu na danou entalpii ve SK. Znamená to tedy, že na tyto média se využije část tepla přivedeného do SK a tím pádem se sníží část tepla, které je určeno buďto pro vypaření vody ve varnicích, či zvýšení parametrů páry. Aby byla tato ztráta vyrovnána, je potřeba přivést do kotle více paliva. Následující výpočty jsou provedeny pouze teoreticky a vycházím z údajů, které lze nalézt v **tabulce č.21**.

Název	Značka	Jednotka	Hodnota
Výkon kotle	Q	MW	152,72
Celkové ztráty(bez	$\sum \xi_i$	%	9,2005

SNCR)		MW	138,67
Množství přivedeného paliva	m_{pal}	$\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$	6,892
Výhřevnost paliva	Q_i	MW	25,831
Teplota spalin	t_{spalin}	$^{\circ}\text{C}$	127,8
Údaje o směsi			
Množství vstříkovaného směsi	$m_{směs}$	$\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$	1618,8
		$\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$	0,45
Teplota směsi	$t_{směs}$	$^{\circ}\text{C}$	25
Tlak směsi	$p_{směs}$	bar	6
Entalpie směsi	$i_{směs,voda}$	$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$	167,4
Entalpie páry ze směsi	$i_{směs,pára}$	$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$	2981
Údaje o tlakové vzduchu			
Množství tlakového vzduchu	m_{vz}	$\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$	149
		$\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$	0,42
Entalpie vzduchu při 20°C, tlaku 6bar	$i_{vz,1}$	$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$	418,2
Entalpie vzduchu při teplotě spalin	$i_{vz,2}$	$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$	526,7

Tabulka č.21 Vstupní údaje kotle pro výpočet ztráty u SNCR

Množství převedené energie v palivu

$$Q_p = \frac{m_{pal} \cdot Q_i}{1000} = \frac{6,892 \cdot 25831}{1000} = 178,08 \text{ MW}$$

Výpočet ztráty SNCR

$$\xi_{SNCR} = \frac{m_{směs} \cdot (i_{směs,pára} - i_{směs,voda}) + m_{vz} \cdot (i_{vz,2} - i_{vz,1})}{1000}$$

$$\xi_{SNCR} = \frac{0,45 \cdot (2981 - 167,4) + 0,42 \cdot (526,7 - 418,2)}{1000}$$

$$\xi_{SNCR} = 1,312 \text{ MW} \rightarrow 0,78\% \text{ ztráta}$$

Výpočet přivedené energie s technologií SNCR

$$Q_{p,SNCR} = Q_p + \xi_{SNCR} = 178,08 + 1,312 = 179,392 \text{ MW}$$

VŠB - TUO, Katedra energetiky; Rekonstrukce kotle K9 za účelem dodržení nových emisních limitů

Účinnost kotle s technologií SNCR

$$\eta_k = 100 - \sum \xi_i - \xi_{SNCR} = 100 - 9,2005 - 0,78 = \mathbf{90,0195\%}$$

Výpočet spotřeby paliva s technologií SNCR

$$m_{p,SNCR} = \frac{Q_{p,SNCR}}{Q_i} \cdot 1000 = \frac{179,392}{25831} \cdot 1000 = \mathbf{6,945 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}}$$

11 Shrnutí výpočtů účinnosti kotle

Název	Značka	Jednotka	Hodnota
Palivo			
Množství uhlí	$m_{\text{uhlí}}$	$\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$	6,485
Množství plynu	m_{plynu}	$\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$	0,407
		$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	0,82
Výhřevnost uhlí	$Q_{i,\text{uhlí}}$	$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$	23 691
Výhřevnost plynu	$Q_{i,\text{plynu}}$	$\text{kJ} \cdot \text{m}^{-3}$	16906
Měrný objem spalovacího vzduchu			
minimální	$V_{\text{vs,min}}$	$\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$	6,138
skutečný	V_{vss}	$\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$	7,810
přebytek vzduchu	α	-	1,271
Měrný objem spalín			
minimální - suchých	$V_{\text{ss,min}}$	$\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$	5,917
minimální - vlhkých	$V_{\text{sv,min}}$	$\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$	6,542
skutečný - suchých	V_{ss}	$\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$	8,170
skutečný - vlhkých	V_{ssv}	$\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$	8,811
Ztráty			
hořlavinou ve spalínách	ξ_{CO}	%	0,0105
hořlavinou v tuh.zbytcích	ξ_C	%	3,390
fyzickým teplem spalín	ξ_k	%	4,888
fyzickým teplem tuh.zbytků	ξ_C	%	0,210
sdílením tepla do okolí	ξ_{sv}	%	0,702
SNCR	ξ_{SNCR}	%	0,780
Celková ztráta	$\sum \xi_i$	%	9,9805
Celková účinnost	η_k	%	90,0195
Pracovní výkon kotle	Q	MW	152,72
Přivedená energie	Q_p	MW	178,08
S použitím technologie SNCR			
Přivedená energie s SNCR	$Q_{p,SNCR}$	MW	179,392
Zvýšení spotřeby paliva s SNCR	$m_{p,SNCR}$	$\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$	6,945
		$\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$	190,8

Tabulka č.22 Konečné shrnutí výpočtu, ztrát a účinnosti

12 Závěr

Cílem této diplomové práce bylo všeobecné seznámit s problémy oxidů dusíku, které se vznikají během spalovacích procesů. Popsány jsou jednotlivé typy, jejich charakteristiky a způsoby jejich tvorby. Následně tato diplomová práce seznamuje čtenáře se stávajícími a budoucími emisními limity, které přijdou v platnost v roce 2021.

Další část rešeršní práce popisuje jednotlivé způsoby snižování oxidů dusíku na garantované hodnoty. Ty se skládají z primárního a sekundární opatření a vysvětluje jejich realizovatelnost u jednotlivých energetických zařízení. V následné tabulce lze nalézt jednotlivé výhody a nevýhody těchto metod.

V praktické části práce popisuje konkrétní strmotrubný kotel K9 s granulační komorou o jmenovitém výkonu 200 t/h, dále jeho technická data, stručný popis a naposled jeho hlavní části a další technická zařízení. Tento dvoutahový kotel s přirozenou cirkulací, který se nachází v Ostravě-Kunčice jako jeden z jedenácti kotlů.

Následně jsou vypočítány jednotlivé tepelné ztráty a konečná účinnost kotle, které tvořily část garančního projektu. Procentuální hodnota těchto ztrát činí **9,2%**, tedy účinnost kotle je **90,8%**. Nutno je podotknout, že tyto ztráty jsou zatím **bez vlivu technologie SNCR**. Ta bude vysána dále. Shrnutí jednotlivých ztrát lze nalézt v kapitole 8.1.

Hlavní praktickou částí bylo snížení oxidů dusíku. Toho bylo docíleno pomocí primárního opatření, tedy instalací nových **nízkoemisních práškových hořáků s integrovanými COG hořáky**, jejich vertikálnímu uložení a následným dokonalým dávkováním poměru palivo-vzduchu. Dále novým **dynamickým třídičem**, který byl nahrazen postarším stacionárním. Tento třídič je charakteristický vysokou účinností, kde prášek na výstupu dosahuje jemnosti 0,075mm. Toto opatření prováděla firma Provyko s.r.o. Po primárních opatření byla dosažena hodnota oxidů dusíku přibližně **320 -340 mg · m⁻³**

Aby došlo ke snížení oxidů dusíku na hodnotu **200 mg · m⁻³**, je potřeba na kotel nainstalovat sekundární opatření. Byla tedy zvolena technologie **SNCR**. Jako reagent je použito **25% čpavkové vody**, která bude v daném poměru dále s demi vodou a stlačeným vzduchem rozstříkována ve spalovací komoře. V kapitole 10.3 je proveden výpočet množství reagentu potřebného k požadovanému stupni redukce emisí NO_x, tj. snížení o

VŠB - TUO, Katedra energetiky; Rekonstrukce kotle K9 za účelem dodržení nových emisních limitů
přibližně $135 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$. Teoretická spotřeba reagentu (25% čpavkové vody), která je závislá na výkonu paliva je $124 \text{ l} \cdot \text{h}^{-1}$.

V kapitole 10.1 je návrh celkového vstřikovacího kopí. **Hrot trysky** kopí byl navrhnout s **plošným rozstříkem**, protože kotel K9 je větších rozměrů a musí pokrýt velkou plochu rozstříku. Aby bylo možností vsunutí vstřikovacího kopí, byly potřeba provést konstrukční změny a to **výhyby výparných trubek**, které jsou detailněji popsány v kapitole 10.4.

V poslední části této práce je popsán vliv technologie SNCR na účinnost kotle. **Ztráty vlivem SNCR** činí 1,312MW, která je potřeba k ohřátí reagentu a následnému odpaření. Procentuální hodnota je **0,78%**. Tuto ztrátu je potřeba nahradit dodáním více paliva do kotle. Jedná se o přibližně $190,9 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$.

Technologie SNCR má výhodu v jednoduchosti konstrukce, cenové nenáročnosti a vhodným sekundárním opatřením pro starší kotle. Nevýhody jsou ty, že popílek obsahuje následné čpavkové soli a je tedy nutnost zvážit následný odvoz a jeho využití. Dalšími jsou snížení celkové účinnosti kotle a přívod více paliva a zvýšený pohyb aut s dovozem čpavkové vody.

Dne 17.1.2019 proběhly na kotli K9 garanční zkoušky, které byly úspěšné. Kotel K9 tedy splňuje emisní limity, a to udržování NO_x **pod $200 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$** .

13 Seznam použitých značek a zkratek

Značka	Jednotka	Název
A	$\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$	obsah popela
A;A ₀ ;A _a	-	konstanty rovnice pro výpočet c_s
a1	$\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$	podíl uhlíku paliva, spáleného na CO
a2	$\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$	podíl nespáleného CH ₄
B;B ₀ ;B _a	-	konstanty rovnice pro výpočet c_s
b	$\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$	podíl nespáleného uhlíku
C	$\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$	obsah uhlíku
C;C ₀ ;C _a	-	konstanty rovnice pro výpočet c_s
c	%	koncentrace roztoku čpavkové vody
c_s	$\text{kJ} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$	střední měrná tepelná kapacita spalín (při stálém tlaku)
c_n	$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	střední měrná tepelná kapacita tuhých zbytků
DAF	$\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$	obsah prchavé hořlaviny
H	$\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$	obsah vodíku
h	$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	entalpie
M	$\text{kg} \cdot \text{kmol}^{-1}$	molární hmotnost plynu
m	$\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$ nebo $\text{kg} \cdot \text{hod}^{-1}$	hmotnostní průtok
N	$\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$	obsah dusíku
O	$\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$	obsah kyslíku
p	Pa nebo MPa	tlak
q	kJ	množství tepla
Q _i	$\text{kJ} \cdot \text{s}^{-1}$;kW;MW	tepelný tok
Q _i ^r	$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$;kJ·m ⁻³	výhřevnost(spalné teplo)
R1-R10	-	pomocné konstanty stechiometrických výpočtů
S	$\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$	obsah síry
t	°C	teplota
V	$\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ nebo $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$	objem vzduchu nebo spalín vztažený na 1kg nebo 1m ³ paliva
W	$\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$	obsah vody

X	$\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$	hmotnostní podíl složky tuhých zbytků
Y	$\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$	hmotnostní podíl složky ve směsi plynů
α	-	součinitel přebytku vzduchu
β	-	stechiometrický přebytek reagentu
ξ	%	relativní tepelná ztráty
η	%	účinnost
μ	$\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$	koncentrace nespáleného uhlíku ve spalínách
ν	-	relativní vlhkost
ρ	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	hustota
ω	$\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$	objemový podíl složky ve směsi plynů

13.1 Význam použitých indexů

Značka	Název
Ar	argon
b	barometrický
C	uhlík; hořlavina v tuhých zbytcích
CO	oxid uhelnatý; hořlavina ve spalínách
CO ₂	oxid uhličitý
H ₂	vodík
H ₂ O	voda; vodní pára
i	složka směsi; člen souboru
j	jmenovitá hodnota
k	koncový, komín
min	minimální (teoretický)
N ₂	dusík
NH ₄ OH	čpavková voda
O ₂	kyslík
ok	okolí
pal	palivo; přivedeno palivem
pop	popílek
s	spaliny
sk	škvára; struska
sm	směs

VŠB - TUO, Katedra energetiky; Rekonstrukce kotle K9 za účelem dodržení nových emisních limitů

SNCR	selektivní nekatalytická redukce
SO ₂	oxid siřičitý
spal	spalitelný
sr	spaliny recirkulované
ss	spaliny suché
sv	sdílení tepla do okolí
t	celkový (totální)
v	vzduchu
vs	vzduch suchý

14 Seznam tabulek

Tabulka č.1 Mezní hodnoty emisí (v mg/m³) pro NO_x pro spalovací zařízení využívající pevná nebo kapalná paliva, s výjimkou plynových turbín a motorů

Tabulka č.2 Závěry o BAT u emisí NO_x pro spalování černého a/nebo hnědého uhlí do ovzduší

Tabulka č.3 Produkce NO_x u jednotlivých zařízení

Tabulka č.4 Celkové shrnutí snižování NO_x pomocí primárního opatření

Tabulka č.5 Shrnutí SCR a SNCR metody

Tabulka č.6 Emisní limity u K8, K9 a K10 do roku 2020 (Hodnoty se uvádí bez primárních a sekundárních opatření)

Tabulka č.7 Technická data kotle K9

Tabulka č.8 Složení paliva

Tabulka č.9 Složení vysokopevního plynu

Tabulka č.10 Složení koksárenského plynu

Tabulka č.11 Složení výsledné směsi plynu

Tabulka č.12 Molární hmotnost plynů

Tabulka č.13 Molární hmotnost plynů

Tabulka č.14 Tabulka hodnot koeficientů

Tabulka č.15 Vstupní údaje kotle K9

Tabulka č.16 Tabulka jednotlivých ztrát kotle

Tabulka č.17 Teploty a entalpie předehřívání vzduchu na vstupu a výstupu

Tabulka č.18 Shrnutí hořáků na kotli K9

Tabulka č.19 Vlastnosti reagentu

Tabulka č.20 Hmotnosti jednotlivých složek

15 Seznam obrázků

Obrázek č.1 Tvorba NO_x v závislosti na teplotě

Obrázek č. 2 Podíl jednotlivých sektorů na emisích NO_x v ČR v roce 2016

Obrázek č. 3 Průměrná roční koncentrace NO_x v ČR v roce 2016

Obrázek č.4 Vliv přebytku spalovacího vzduchu na účinnost a kvalitu spalování

Obrázek č.5 Postupný přívod spalovacího vzduchu

Obrázek č.6 Odstupňování dávkování paliva

Obrázek č.7 Air-staged low NO_x hořáky

Obrázek č.8 Air-staged low NO_x hořáky

Obrázek č.9 Princip metody SCR

Obrázek č.10 Katalyzátor LJGT000 pro metodu SCR

Obrázek č.11 Grafické znázornění metody High Dust

Obrázek č.12 Grafické znázornění metody Low Dust

Obrázek č.13 Grafické znázornění metody Tail-End

Obrázek č.14 Závislost odloučení NO_x na teplotě spalin

Obrázek č.15 Technologie SNCR

Obrázek č.16 Rozmístění hořáku ve SK

Obrázek č.17 Snímání hladiny napájecí vody v bubnu

Obrázek č.18 Průřez dynamického třídiče

Obrázek č.19 Detail uhlí před vstupem do mlýnu

Obrázek č.20 Nízkoemisní hořák

Obrázek č.21 Detail uhelného prášku, který je připraven pro spalování

Obrázek č.22 Schéma SNCR

Obrázek č.23 Míchací a měřicí modul

Obrázek č.24 Detail hrotu trysky vstřikovacího kopí v ochranné trubce

Obrázek č.25 Detail směšovací komory

Obrázek č.26 Detail zabezpečení vstřikovacího kopí k přírubě

Obrázek č.27 Pohled na vstřikovací kopí ve SK

Obrázek č.28 Nádrže čpavkové vody a její opatření bezpečnostní jímkou

Obrázek č.29 Zapojení vstřikovacího kopí

Obrázek č.30 Celková sestava výhybů ve SK a vsunuté vstřikovací kopí

Obrázek č.31 Naměřené teploty [°C] ve SK ve výšce 21,5m

Obrázek č.32 Naměřené teploty [°C] ve SK ve výšce 26m

Obrázek č.33 Termokamera pro měření teploty ve SK

16 Seznam grafů

Graf č.1 Podíl paliva ve výrobě elektrické energie

Graf č.2 Postupné snižování NO_x v ČR u stacionárních zařízení větších, než 5MW

17 Výkresové přílohy

Příloha č.1 I. úroveň vstřiku [formát: A3]

Příloha č.2 II. úroveň vstřiku [formát: A3]

Příloha č.3 SNCR zařízení [formát: A3]

Příloha č.4 Výhyby výparných trubek [formát: A3]

Příloha č.5 Kotel K9 [formát: A3]

18 Seznam použité literatury

- [1] INTEGRATED POLLUTION PREVENTION AND CONTROL (IPPC). Reference Document on Best Available Techniques for Large Combustion Plants [online]. [cit. 2018 - 12 - 29]. European Commission, July 2006.
- [2] Firemní podklady pro kotel K9
- [3] BUDAJ, CSC., Doc. Ing. Florian. *Parní kotle : Podklady pro tepelný výpočet*. čtvrté přepracované. Brno : Vysoké učení technické v Brně, 1992. 200 s.
- [4] DLOUHÝ, CSC., Doc. Ing. Tomáš. *Výpočty kotlů a spalinových výměníků*. vydání třetí. Praha : České vysoké učení technické, 2007. 212 s.
- [5] *Energetický regulační úřad*. [online]. [cit. 2018 - 12 - 13]. Dostupné z: https://www.eru.cz/documents/10540/462820/Rocni_zprava_provoz_ES_2016.pdf/800e5a09-a58a-4a73-913f-abc30cda42a5
- [6] *Energetika v České republice*. [online]. [cit. 2018 - 12 - 13]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Energetika_v_%C4%8Cesku
- [7] *Oxidy dusíku - odkud se berou*. [online]. [cit. 2018 - 12 - 13]. Dostupné z: <http://www.ovzdusi-brno-jm.cz/index.php/2018/03/08/oxidy-dusiku-odkud-se-berou/>
- [8] *Emisní limity u K8, K9 a K10 do roku 2020*. [online]. [cit. 2018 - 12 - 13]. Dostupné z: <https://www.msk.cz/assets/temata/ippc/files/tameh---zavod-4---energetika.pdf>
- [9] *O spalování tuhých paliv v lokálních topeništích*. [online]. [cit. 2018 - 12 - 13]. Dostupné z: <https://energetika.tzb-info.cz/8644-o-spalovani-tuhych-paliv-v-lokalnich-topenistich-2>
- [10] *Úvod do teorie spalování tuhých paliv*. [online]. [cit. 2018 - 12 - 16]. Dostupné z: <http://vec.vsb.cz/katalog-obrazku/clanek-115/194-spalovani-tuhych-paliv-1.pdf>
- [11] *Emisní limit*. [online]. [cit. 2018 - 12 - 19]. Dostupné z: <https://www.mvcr.cz/clanek/emisni-limit.aspx>
- [12] *Český hydrometeorologický ústav - oxidy dusíku*. [online]. [cit. 2018 - 12 - 28]. Dostupné z: http://portal.chmi.cz/files/portal/docs/uoco/isko/grafroc/16groc/gr16cz/IV3_NOx_CZ.html

VŠB - TUO, Katedra energetiky; Rekonstrukce kotle K9 za účelem dodržení nových emisních limitů

[13] *Snižování emisí NO_x*. [online]. [cit. 2018 - 12 - 28]. Dostupné z:

https://www.cez.cz/edee/content/file/static/encyklopedie/encyklopedie-energetiky/02/snizovem_5.html

[13] *Nitrogen Oxide Denitrification Catalyst for Power Station Industrial Denitration SCR Catalyst*. [online]. [cit. 2019 - 1 - 28]. Dostupné z:

<https://huihuangcatalytic.en.made-in-china.com/product/pqrJitPSvFRf/China-Nitrogen-Oxide-Denitrification-Catalyst-for-Power-Station-Industrial-Denitration-SCR-Catalyst.html>

[15] *Elektrárna Dětmárovice*. [online]. [cit. 2019 - 1 - 28]. Dostupné z:

<http://www.allforpower.cz/UserFiles/file/detmarovice.pdf>

[16] *Selektivní katalytická redukce - HIGH DUST*. [online]. [cit. 2019 - 2 - 2]. Dostupné z:

https://www.researchgate.net/figure/SCR-configurations-a-High-dust-SCR-b-low-dust-SCR-c-tail-end-SCR_fig1_237010483

[17] *EESAC. Ammonia slip*. [online]. [cit. 2019 - 2 - 2]. Dostupné z:

http://www.eesac.eu/services_industry_air_pollution_control.php?lang=en